

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

TRABAJO DE GRADO

ÁNGEL ANDRÉS ANDRADE MORALES

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
2018**

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:
MAGÍSTER EN INGENIERÍA MECÁNICA**

ÁNGEL ANDRÉS ANDRADE MORALES

**DIRECTOR DEL PROYECTO:
ÁLVARO RESTREPO Dr. Eng**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2018**

NOTA DE ACEPTACIÓN

.....
.....
.....

.....

JURADO 1

.....

JURADO 2

.....

DIRECTOR TRABAJO DE GRADO

Pereira-Risaralda

09 de marzo de 2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente al Doctor Álvaro Restrepo por el apoyo y acompañamiento recibido durante todo este proceso. Agradezco a mi familia y amigos cercanos.

Agradezco a la Vicerrectoría de Investigación, Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira, por el apoyo en todo momento brindado.

Agradezco especialmente al Laboratorio de Ensayos para Equipos Acondicionadores de Aire- LPEA y al grupo de investigación en gestión energética GENERGÉTICA por el apoyo brindado durante este proceso formativo.

A la Universidad Federal de Santa Catarina, a LABCET, al Doctor Edson Bazzo por aceptarme en la Universidad y ser mi guía en Brasil, al Doctor Ricardo Hartmann por el acompañamiento académico y humano brindado, al Doctor Amir Antônio Martins Oliveira por enseñarme combustión y aclararme tantas dudas, al Doctor Paulo Cesar Phillipi por las magistrales clases de termodinámica avanzada y en general a todo el personal de LABCET por su calurosa acogida la cual contribuyó enormemente a mi formación personal y académica y me hacen tener excelentes recuerdos de Brasil.

A la empresa productora de energía SOPESA S.A E.S.P por el apoyo y la información brindada.

A la empresa de manejo y gestión ATESA S.A E.S.P por el apoyo y la información brindada.

A la empresa Recicle Catarinense de Resíduos LTDA y al relleno sanitario de la ciudad de Brusque en Brasil por el apoyo y la información brindada.

A mis compañeros Giancarlo Daraviña, Juan Mario Zapata, Wilfor Mosquera, Raúl Puentes, Julian Barrera, Thiago Croisfelt, Arthur Ronan, Jônatas Vicente, Felipe Lewiski y todas las personas de LABCET, LPEA y de GENERGETICA.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	11
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.2	OBJETIVOS	13
1.3	CONTRIBUCIÓN	13
1.4	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	14
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	SISTEMAS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RSU EN COLOMBIA	15
2.2	APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO	17
2.2.1	Estado del arte captación de biogás	18
2.3	PLANTAS DE INCINERACIÓN CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA.....	21
2.3.1	Estado del arte técnica de incineración	21
2.4	ESCENARIOS TÉCNICOS DE ESTUDIO.....	23
2.4.1	Escenario técnico 1.....	24
2.4.2	Escenario técnico 2.....	25
2.4.3	Escenario	26
3.	INCINERACIÓN CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA.....	28
3.1	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA WtE DE SAN ANDRÉS	28
3.1.1	Disposición de residuos sólidos entrantes	28
3.1.2	Pretratamiento de residuos	29
3.1.3	Carga de residuos en el proceso	29
3.1.4	Etapas de recuperación y conversión de energía	30
3.1.5	Lavado de gases de combustión	31
3.1.6	Monitorización y control de emisiones.....	31
3.1.7	Control y uso de agua para proceso.....	32
3.1.8	Gestión y tratamiento de cenizas/cenizas de fondo.....	32
3.2	EVALUACIÓN DEL ESCENARIO TÉCNICO 1.....	32
3.2.1	Cálculo del PCI de los RSU del relleno sanitario <i>Magic Garden</i>	33
3.2.2	Análisis de energía planta WtE San Andrés.....	38
3.3	EVALUACIÓN ESCENARIO TÉCNICO 2.....	41
3.3.1	Cálculo del poder calorífico de los RSU en <i>cofiring</i>	42

3.3.2	Análisis de energía planta WtE Bogotá	48
3.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52
4.	APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO	55
4.1	MODELOS DE ESTIMACIÓN DE BIOGÁS GENERADO EN EL RELLENO.....	55
4.1.1	Modelos teóricos.....	55
4.1.2	Medición directa del biogás generado en el relleno.....	61
4.2	EVALUACIÓN ESCENARIO TÉCNICO 3.....	62
4.2.1	Resultados simulación modelo <i>LandGEM</i>	62
4.2.2	Resultados simulación modelo <i>GasSIM</i>	65
4.2.3	Resultados simulación modelo colombiano de biogás	67
4.3	APLICACIONES DEL BIOGÁS.....	68
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	72
5.	CONCLUSIONES	76
	REFERENCIAS.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas de disposición final RSU Colombia].....	12
Figura 2. Técnicas de aprovechamiento de RSU- <i>WtE</i>	12
Figura 3. Representación de entradas y salidas del relleno sanitario.....	18
Figura 4. Resultados caracterización RSU del relleno sanitario <i>Magic Garden</i>	24
Figura 5. Representación de la planta <i>WtE</i> de San Andrés Colombia	25
Figura 6. Resultados caracterización RSU del relleno sanitario <i>Doña Juana</i>	26
Figura 7. Resultados caracterización RSU del relleno sanitario La Glorita.....	26
Figura 8. Zona de recepción de los RSU de San Andrés.	29
Figura 9. Foso de pretratamiento de los RSU planta <i>WtE</i> de San Andrés.....	29
Figura 10. Horno rotativo de RSU planta RSU de San Andrés.....	30
Figura 11. Generador de vapor pirotubular de la planta RSU de San Andrés.....	31
Figura 12. Sistema de lavado de gases planta RSU de San Andrés.	31
Figura 13. Sistema de control de emisiones de la planta RSU de San Andrés.	32
Figura 14. Sistema de control y uso de agua para proceso, planta RSU de San Andrés.	32
Figura 15. Proceso de combustión de RSU.	33
Figura 16. Diagrama termodinámico planta <i>WtE</i> de San Andrés- Colombia.	37
Figura 17. Proceso de combustión <i>cofiring</i> planta <i>WtE</i> Bogotá.	42
Figura 18. Proceso de combustión RSU planta <i>WtE</i> Bogotá según las condiciones del caso A.	44
Figura 19. Proceso de combustión <i>cofiring</i> planta <i>WtE</i> Bogotá según las condiciones del caso B. .	45
Figura 20. Proceso de combustión <i>cofiring</i> planta <i>WtE</i> Bogotá según las condiciones del caso C. .	46
Figura 21. Proceso de combustión <i>cofiring</i> planta <i>WtE</i> Bogotá según las condiciones del caso D. .	47
Figura 22. Planta <i>WtE</i> propuesta para el relleno sanitario Doña Juana.	48
Figura 23. Especies generadas en el relleno La Glorita mediante el modelo <i>LandGEM</i>	64
Figura 24. Especies generadas en el relleno La Glorita mediante el modelo <i>GasSIM</i>	66
Figura 25. Especies generadas en el relleno La Glorita mediante el modelo colombiano.	67
Figura 26. Diagrama de flujo de los diferentes sistemas para el aprovechamiento de biogás.	70
Figura 27. Diseño en CAD del sistema de aprovechamiento de biogás de relleno sanitario.....	70
Figura 28. Banco de filtrado y purificación de biogás de relleno sanitario.....	71
Figura 29. Potencia eléctrica generada por el biogás del relleno La Glorita.....	72

Figura 30. Modelos de generación de biogás del relleno sanitario La Glorita.....	73
Figura 31. Dióxido de carbono equivalente evitado por la no liberación de metano.....	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad total de RSU generados en Colombia	11
Tabla 2. Composición química promedio del biogás	17
Tabla 3. Metano producido y electricidad generada de rellenos sanitarios.....	19
Tabla 4. Estimación de las emisiones mundiales de metano de rellenos.	20
Tabla 5. Potencial de recuperación energética de metano en el mundo.	21
Tabla 6. Caracterización RSU del relleno sanitario <i>Magic Garden</i>	34
Tabla 7. Resultados del PCI estimado de los RSU del relleno sanitario <i>Magic Garden</i>	35
Tabla 8. Condiciones de operación planta WtE San Andrés.	37
Tabla 9. Resultados del modelo de energía de la planta <i>WtE</i> San Andrés Colombia.	41
Tabla 10. Caracterización de los RSU de Colombia.	42
Tabla 11. Caracterización elemental de los RSU del relleno Doña Juana	43
Tabla 12. Resultados poder calorífico RSU para las condiciones del Caso A.	43
Tabla 13. Resultados poder calorífico RSU para las condiciones del Caso B.	44
Tabla 14. Resultados poder calorífico RSU para las condiciones del Caso C.	45
Tabla 15. Resultados poder calorífico RSU para las condiciones del Caso D.	46
Tabla 16. Resultados poder calorífico RSU relleno sanitario Doña Juana, RSU para las condiciones presentadas en el Caso D.	47
Tabla 17. Condiciones de operación planta WtE San Andrés.	48
Tabla 18. Resultados planta <i>WtE cofiring</i> Bogotá Colombia.....	51
Tabla 19. Comparación de los resultados obtenidos para los escenarios técnicos 1 y 2.....	52
Tabla 20. Ahorro de combustible mediante la implementación de la técnica <i>cofiring</i>	53
Tabla 21. Evaluación de los escenarios.	54
Tabla 22. Modelos de generación de biogás en rellenos sanitarios.	56
Tabla 23. Valores estimados del parámetro <i>MCF</i>	58
Tabla 24. Condiciones iniciales para la estimación del biogás mediante el modelo <i>LandGEM</i>	62
Tabla 25. Cantidad estimada de RSU depositados finalmente en el relleno sanitario La Glorita....	63
Tabla 26. Condiciones iniciales para la estimación del biogás mediante el modelo <i>GasSIM</i>	65
Tabla 27. Condiciones iniciales para la estimación del biogás mediante el modelo colombiano. ...	67
Tabla 28. Condiciones iniciales para la simulación de combustión en el software <i>Gaseq</i>	68
Tabla 29. Reactivos y productos generados en la reacción de combustión del biogás	69

RESUMEN

La población mundial está en constante crecimiento y para sobrevivir como especie se necesitan recursos y energía. A medida que se acelera el crecimiento poblacional, se acelera también el consumo de recursos y materias primas, lo cual contribuye con una mayor producción de residuos sólidos. La producción de residuos ocasiona problemas al planeta en diversas áreas, principalmente aquellos asociados con la disposición final.

Entre los problemas asociados a las malas prácticas relacionadas con la disposición final de los residuos se destacan: el impacto ambiental causado por la emisión de gases de efecto invernadero-GEI y el cambio climático, la filtración de lixiviados a las aguas subterráneas, los vectores endémicos, las plagas, la generación de malos olores, los problemas sociales relacionados con actividades de recolección y reciclado en rellenos sanitarios no controlados, entre otros. Debido a ello, la temática asociada con la gestión y manejo de residuos sólidos es amplia e interdisciplinar. Abarca campos del conocimiento tales como la administración de políticas públicas, ambiental, social, antropológica, económica y en el área de ingenierías, entre otras. [4]

Con el fin de mitigar el problema asociado a la disposición final de residuos, éste trabajo de grado expone la evaluación de dos técnicas de recuperación energética (*Waste to Energy-WtE*). Las técnicas seleccionadas para ser objeto de estudio son la incineración de residuos sólidos urbanos y el aprovechamiento de biogás de relleno sanitario. Se seleccionaron estas dos técnicas ya que se encuentran ampliamente desarrolladas e implementadas a nivel mundial, en general obteniéndose buenos resultados [6].

El objetivo general de este trabajo es realizar un estudio del aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos- RSU considerando la valoración termodinámica de las dos técnicas *WtE* en mención, aplicadas a tres ciudades del país.

La primera técnica *WtE* a considerar, es la incineración de RSU [5]. Para su implementación se propuso un escenario técnico de aprovechamiento mediante el análisis de un ciclo termodinámico para generar electricidad y calor de proceso, reproduciendo el funcionamiento de la planta *WtE* de la isla de San Andrés y proponiendo una planta *WtE* en *cofiring* para la ciudad de Bogotá.

La segunda técnica *WtE*, consiste en analizar la generación y captación de biogás de relleno sanitario [5]. Para la implementación, se propuso un escenario técnico de aprovechamiento del biogás en aplicaciones de moto generadores.

La motivación para desarrollar este trabajo es contribuir con una investigación que sirva como punto de referencia para futuros trabajos relacionados con el manejo de residuos en nuestro país, dado que la información en Colombia es escasa en ésta área.

La información utilizada para desarrollar este trabajo de grado fue obtenida de bases de datos y artículos científicos publicados por reconocidos autores y grupos de investigación; de visitas técnicas a las empresas de gestión y manejo de residuos en Colombia, de la formación académica de la maestría en la Universidad Tecnológica de Pereira- UTP y las asignaturas estudiadas en el programa de post graduación en ingeniería mecánica- POSMEC de la Universidad Federal de Santa Catarina, UFSC Brasil.

1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo presenta el planteamiento del problema asociado al aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos- RSU, mediante la evaluación de dos técnicas las cuales son: el aprovechamiento energético del biogás captado del vertedero y la incineración con recuperación energética. En este capítulo se presentan los objetivos, la contribución y el orden del trabajo de grado.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia está localizada en sur América, rodeada por el mar Caribe, el océano pacífico, Panamá, Venezuela, Ecuador, Perú, y Brasil. Colombia tiene un área aproximada de 1,1 millones de kilómetros cuadrados y una población cercana a 48 millones de habitantes según cifras del departamento administrativo nacional de estadística- DANE [1]. Colombia es la cuarta economía de América latina, con una tasa de crecimiento alrededor del 4% según cifras del banco mundial [2]. Colombia produce café, flores, frutas, esmeraldas, carbón, minerales y petróleo. Sus principales actividades económicas son la producción de combustibles derivados del petróleo, la agricultura, la industria y los servicios. Debido a la variedad de pisos térmicos, condiciones como la temperatura y la pluviosidad dependen de la altitud de cada ciudad respecto al nivel del mar [3].

La generación de RSU en Colombia es aproximadamente 26500 toneladas al día, según la información oficial presentada por la súper intendencia de servicios públicos domiciliarios- SSPD [4]. La tasa de crecimiento en la generación de residuos sólidos se ubica entre el 4 y el 8%, de los cuales entre el 50 y 60% son residuos orgánicos. La Tabla 1 muestra un estimativo de los RSU generados en Colombia en los últimos años [4].

Tabla 1. Cantidad total de RSU generados en Colombia [4].

Año	RSU $\left[\frac{\text{ton}}{\text{día}}\right]$
2010	26537
2011	24647
2012	26726
2013	25054*
2014	26528

Como se observa en la Tabla 1, para el año 2013 el nivel de RSU generados disminuyó. Esto se explica ya que de los 400 sitios de disposición final que reportaron cifras en el 2012, solo 364 sitios lo hicieron para el 2013 y en total 186 municipios no contaban con ninguna información referente al tema, por lo cual esta cifra es considerablemente mayor a la presentada.

En la Figura 1 se aprecia que el porcentaje de disposición de RSU en rellenos sanitarios no controlados, también llamados depósitos de RSU a cielo abierto, está por encima de plantas de aprovechamiento de residuos, contrariando las teorías de buenas prácticas en administración, gestión y manejo de RSU.

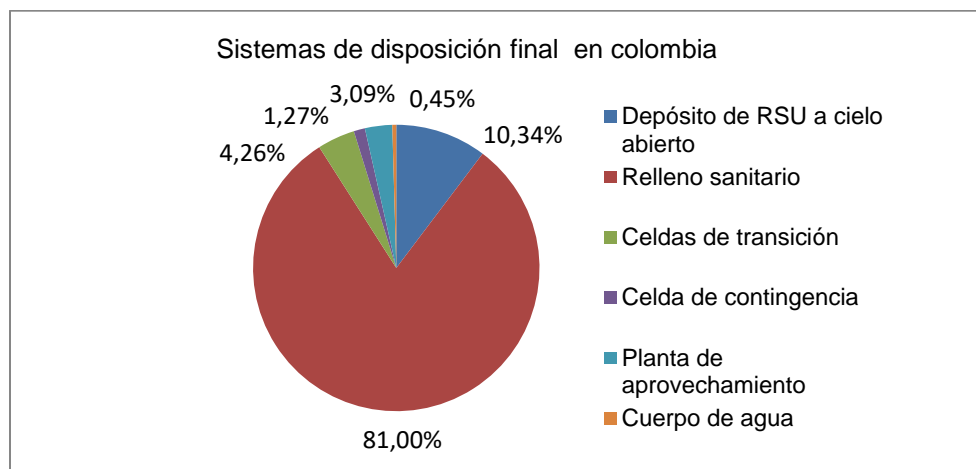


Figura 1. Sistemas de disposición final RSU Colombia, adaptado de [4].

Según la Figura 1, los sistemas de manejo y gestión de residuos sólidos en sistemas no controlados, corresponden aproximadamente con el 17% distribuido en cuerpos de agua, botaderos o rellenos sanitarios, celdas de contingencia y en quemas. Por otro lado, menos del 3% de los sistemas de disposición final en Colombia, corresponden a plantas de aprovechamiento dedicadas al reciclado de residuos como vidrios y metales. Como alternativa para la disposición final de los residuos sólidos, se desarrollaron las técnicas de recuperación energética *WtE* que se muestran en la Figura 2, las cuales presentan diversas alternativas para generar energía, ya sea en forma de electricidad o calor. [5]

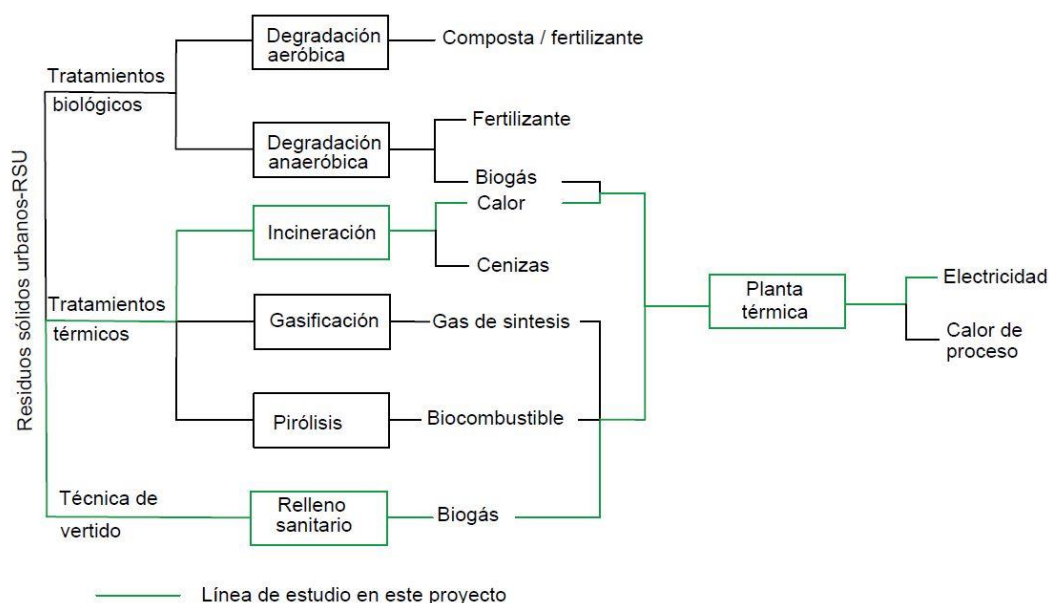


Figura 2. Técnicas de aprovechamiento de RSU- *WtE*, adaptado de [5].

Las dos corrientes principales de las técnicas *WtE* son los tratamientos biológicos y los tratamientos térmicos. Los tratamientos biológicos como el compostaje también llamada degradación aeróbica y la digestión anaeróbica o biodigestión, son alternativas para recuperar energéticamente los RSU orgánicos de degradación rápida, en forma de composta y biogás.

Los tratamientos térmicos se presentan como una opción para reducir la cantidad de residuos post reciclados, principalmente compuestos por residuos inorgánicos como plásticos, papel, cartón y tela, que posteriormente son convertidos en cenizas y enviadas al vertedero. [6]

1.2 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio del aprovechamiento energético de los RSU considerando la valoración termodinámica de diferentes alternativas de utilización.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Caracterizar los RSU de las ciudades: Santafé de Bogotá, Pereira-Risaralda y San Andrés-isla;
- b. Analizar la técnica *WtE* de la incineración para el relleno sanitario *Magic Garden* (San Andrés) y *cofiring* (Bogotá) para el relleno sanitario Doña Juana;
- c. Estimar la cantidad promedio de biogás generado en el relleno La Glorita (Pereira);
- d. Presentar recomendaciones técnicas que faciliten el desarrollo futuro de proyectos, tomando como consideración los resultados obtenidos según las alternativas anteriores.

1.3 CONTRIBUCIÓN

Este trabajo presenta información actualizada acerca de las técnicas de recuperación energética en Colombia, mediante el análisis de dos técnicas *WtE* aplicadas en tres ciudades del país.

La primera técnica de estudio es la captación de biogás del relleno sanitario aplicada al relleno sanitario La Glorita Pereira, que hace parte de una ciudad intermedia Colombiana.

La segunda técnica analiza un prototipo de planta *WtE* construida en la isla San Andrés- Colombia, la cual fue entregada en operación y puesta a punto desde el año 2010, aunque aún está sin funcionar continuamente debido a problemas de concesión administrativa, políticos y manejo de recursos económicos [7].

A partir de los resultados del estudio de la planta prototipo de San Andrés, se propone ampliar la capacidad de la planta al ser diseñada bajo las condiciones de la ciudad capital del país. También se propone analizar la planta mediante la combustión combinada o *cofiring* y concluyendo si esta configuración favorece la eficiencia térmica del ciclo.

Es importante investigar este tipo de proyectos en el país ya que la información asociada al tema es escasa. Actualmente los gobiernos de diferentes países, adoptan rigurosas normativas para mitigar problemas relacionados con el cambio climático y la conservación de los recursos naturales, estimulando el desarrollo de tecnologías y productos ambientalmente sostenibles. Algunos países desarrollados como Alemania, España, Holanda, Italia, Suiza, Japon y otros, han realizado altas inversiones para promover y construir plantas *WtE*. [8]

La corriente que estudia las técnicas *WtE* son de gran relevancia ya que involucra tópicos de interés estratégicos para nuestro país, como son la energía, el medio ambiente, el impacto social y el valor económico, aunque como se ha mencionado, la contribución de este trabajo está enfocada principalmente en el área de la ingeniería mecánica y las ciencias térmicas.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El capítulo 1 presenta el planteamiento del problema respecto al aprovechamiento energético a partir de los residuos sólidos urbanos mediante la evaluación de dos técnicas que son el aprovechamiento energético del biogás captado del relleno sanitario y la incineración con recuperación energética. Este capítulo presenta los objetivos, la contribución y el orden del trabajo de grado.

En el capítulo 2 se presenta la revisión bibliográfica acerca del estado del arte de la disposición final y manejo de residuos en Colombia y los fundamentos de las técnicas *WtE* a analizar. En este capítulo se presenta la caracterización de los RSU para las ciudades de análisis y se definen los tres escenarios técnicos objetos de estudio.

En el capítulo 3 se presenta la evaluación de la técnica de incineración con recuperación energética para los rellenos *Magic Garden* y Doña Juana; el estado del arte, las etapas del proceso de incineración, los mecanismos de simulación implementados para determinar el poder calorífico de los residuos, la metodología utilizada para la simulación del fenómeno.

En el capítulo 4 se presenta el análisis de la técnica de captación de biogás para el relleno sanitario La Glorita. Se exponen los modelos teóricos y experimentales para estudiar el fenómeno y se evalúan tres diferentes modelos seleccionados como objetos de estudio. También se analizan los resultados y se comparan con los publicados en la literatura.

En el capítulo 5 finalmente se presentan las recomendaciones técnicas y conclusiones.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se presenta la revisión bibliográfica y el estado del arte de la disposición final de residuos en Colombia y los fundamentos de las técnicas *WtE* a analizar. Además se presenta la caracterización de los residuos sólidos urbanos para las tres ciudades de análisis, y se definen los tres escenarios técnicos como casos de estudio a evaluar.

2.1 SISTEMAS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RSU EN COLOMBIA

La problemática ambiental de los residuos sólidos ha cobrado importancia en los últimos años. En Colombia, actualmente se encuentra reglamentada la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos. La política para la gestión de los residuos sólidos tiene su fundamento en la constitución política, la ley 99 de 1993 y la ley 142 de 1994, siendo reglamentada en los decretos 1713 de 2002 y 2820 de 2010. La normativa comprende las resoluciones del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial 1045 de 2003, 838 de 2005, 1390 del 27 de septiembre de 2005, modificada por la resolución 1684 de 2008, y esta a su vez por la 1529 de 2010.

En la resolución 1529 de 2010, se establecieron las pautas para el cierre de los sitios de disposición final como rellenos sanitarios no controlados y celdas de contingencia a cielo abierto, que no cumplían las obligaciones indicadas en los términos establecidos en la resolución 1045 de 2003. [9]

En materia de residuos sólidos, el plan nacional de desarrollo- PND 2010-2014 se enfocó en aumentar el número de municipios que disponen los residuos en forma adecuada y estableció un incentivo económico para los municipios donde se ubiquen celdas de contingencia controladas y rellenos sanitarios regionales. El gobierno nacional expidió el decreto 920 de 2013, el cual reglamenta la forma en que se calcula el valor de tales incentivos. [10]

Adicionalmente, la resolución 1890 de 2011 puso fin a la autorización de celdas transitorias como lo concebía la resolución 1390 de 2005 y permitió la apertura de celdas de contingencia como alternativa para la disposición final de residuos sólidos, durante el proceso de traslado y adaptación a sistemas controlados mediante rellenos sanitarios previamente expedidos y autorizados por las autoridades ambientales y de control. [3]

La normativa en mención, define los siguientes términos como:

- Los sistemas de disposición final contabilizados como adecuados son: relleno sanitario, planta integral, celda de contingencia.
- Los sistemas contabilizados como inadecuados son: celda transitoria, botadero, enterramiento, vertimiento a cuerpos de agua y todo aquel que no cumpla con las definiciones y autorizaciones establecidas y requeridas por las normas y autoridades competentes (Decreto 838 de 2005, Decreto 2820 de 2010, Resolución 1890 de 2011).

- Los sistemas de disposición final de carácter regional se cuentan como infraestructuras que atienden 2 o más municipios.

Según el último informe presentado por las autoridades encargadas de la regulación y control de residuos sólidos [4], en Colombia:

- El 17% (186) de los municipios del país (1102), no contaba con el registro de los datos sobre toneladas dispuestas mensualmente.
- El 66% (21) de los departamentos (32), no fue posible establecer el total de residuos sólidos dispuestos y sólo se cuenta con información parcial.
- El 52% (190) del total de sitios de disposición final disponibles (364), se han suministrado y/o actualizado las autorizaciones ambientales, lo cual imposibilitó conocer el diagnóstico global en relación con las vidas útiles y capacidad de recepción actual de residuos de los sitios en mención.
- En la actualidad, 7 municipios de 1102 no cuentan con ningún sistema de disposición final, realizando quema abierta o vertimiento de los residuos a los cuerpos de agua.
- El 45% (164) del total de sitios de disposición final identificados (364), corresponde a sitios que no cuentan con autorización ambiental.
- El 47% (15) de los departamentos del país (32) presenta una disposición final autorizada para más del 90% del total de sus municipios.
- El 38% (71) del total de sitios con información sobre vida útil (190) cuentan con un tiempo menor a 3 años de vida útil contados a partir de octubre de 2015.
- Se cuenta con 65 rellenos sanitarios regionales (18% del total de sitios de disposición final) que atienden 803 municipios (73% del total de municipios del país). Es decir, un aumento de 38 municipios regionalizados con respecto al año 2013.
- El 92% (24342 ton/día) de los residuos, según información reportada (del total reportado de 26528 ton/día), se está disponiendo en los 65 rellenos sanitarios regionales.

El mayor reto frente a la disposición final está relacionado con alcanzar el cierre definitivo de los sitios inadecuados y no autorizados de disposición final o su conversión a sitios técnica y ambientalmente apropiados que garanticen la realización de las actividades con calidad y continuidad a largo plazo.

Los municipios como entidades que garantizan la prestación del servicio público de aseo, deben planificar adecuadamente las actividades relacionadas con la disposición final de los residuos, antes del periodo de clausura de los rellenos sanitarios existentes. Adicionalmente, los municipios deben dar prioridad dentro del respectivo ordenamiento territorial a la destinación de predios para la apertura de nuevos sitios de disposición final y garantizar la infraestructura necesaria. [4]

2.2 APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO

El biogás es un gas combustible que se genera por la descomposición microbológica de la materia orgánica en un proceso natural que tiene lugar en un entorno húmedo y en ausencia de oxígeno. A este proceso de descomposición se le denomina digestión anaeróbica. La digestión anaeróbica convierte los compuestos complejos en compuestos simples, dando como resultado final la liberación de una mezcla de gases. De esa mezcla, el gas que representa el mayor porcentaje es el metano con una proporción entre el 50 y 60%, mientras que el porcentaje restante se atribuye en gran medida al dióxido de carbono. La composición estimada del biogás de relleno sanitario se muestra en la Tabla 2. [11]

Tabla 2. Composición química promedio del biogás, adaptado de [11].

Parámetro	Unidad	%
Metano	CH ₄	50
Dióxido de carbono	CO ₂	45
Nitrógeno	N ₂	5
Sulfuro de hidrogeno	H ₂ S	<1
Temperatura	°C	10-40
Contenido de humedad	humedad relativa	0-100
Poder calorífico	MJ/m ³	10,8-23,3

Debido al proceso de degradación de la materia orgánica, el gas metano es un producto de los rellenos sanitarios, el cual generalmente es emitido a la atmósfera. La cantidad de metano obtenido varía en función de los siguientes factores:

- La composición de los residuos;
- El tiempo de funcionamiento del relleno sanitario;
- Las condiciones ambientales.

Uno de los principales factores en consideración para la generación de biogás, es el contenido de humedad de los RSU, el cual puede estar contenido en fracciones de volumen entre el 30 y el 70%. La cantidad de residuos inorgánicos no contribuyen con la generación de biogás debido a que no se degradan anaeróbicamente.

Debido a que el biogás es un producto del relleno sanitario, es importante establecer las entradas y salidas asociadas a él. La Figura 3 muestra el esquema de un relleno sanitario con sus respectivas entradas y salidas. En algunos rellenos sanitarios modernos regulados se captura y utiliza el biogás de relleno sanitario, para producir calor o electricidad. Según el estado del arte presentado en la literatura, desde el año 2001 se conoce información estimada en mil rellenos sanitarios que capturaban biogás en todo el mundo. En Estados Unidos se capturan aproximadamente 2,6 millones de toneladas de metano anualmente. [11] [12]

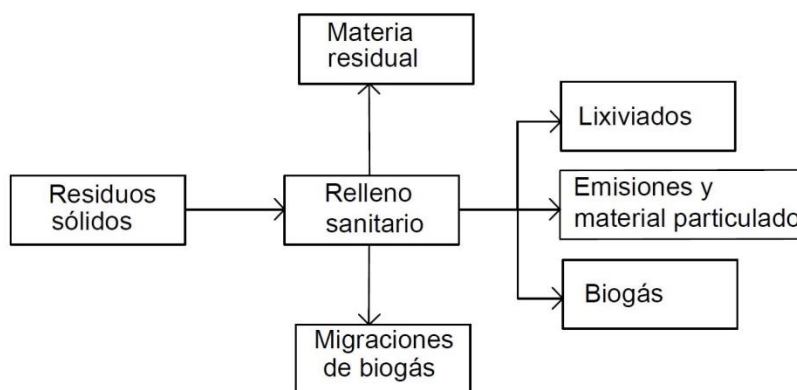


Figura 3. Representación de entradas y salidas del relleno sanitario, adaptado de [12].

Los estudios teóricos y experimentales desarrollados en laboratorios con condiciones controladas, indican que la completa biodegradación anaeróbica de los RSU genera cerca de 200 Nm^3 de metano por tonelada seca de biomasa contenida. Sin embargo, la tasa de generación de metano reportada en los reactores anaeróbicos industriales oscila entre 40 a 80 Nm^3 por tonelada de residuos orgánicos. Algunos rellenos en los Estados Unidos reportan que capturan hasta 100 Nm^3 de metano por tonelada de RSU. Estos resultados arrojan un estimado conservativo de generación de metano alrededor de 50 Nm^3 por tonelada de RSU. [11]

Se estima que la cantidad de RSU depositados en los rellenos de todo el mundo es aproximadamente 1,5 billones de toneladas anualmente. La tasa correspondiente de generación de metano en los rellenos estimada es de 75 billones Nm^3 . Menos del 10% de este combustible es capturado y aprovechado, siendo el 90% emitido a la atmosfera como un gas de efecto invernadero que contribuye con el calentamiento global. [11]

2.2.1 Estado del arte captación de biogás

Existen algunas diferencias de un país a otro en las normativas asociadas con la gestión y manejo integral de los RSU. No obstante, la tendencia mundial es disminuir la cantidad de RSU dispuestos en los rellenos sanitarios. En algunos países como Alemania, Austria, Holanda, Dinamarca, Bélgica, Japón y Suecia, predomina el reciclaje y la recuperación energética en plantas *WtE*, antes que la disposición final en rellenos. Países como Suecia y Japón se han trazado el objetivo de eliminar los rellenos sanitarios. Algunos casos a modo de ejemplos implementados de esta técnica, se presentan en la Tabla 3. [13]

Mientras los rellenos proporcionan una solución simple y económica para el problema asociado a la disposición final de los residuos, éstos causan impactos ambientales incluidos la filtración de lixiviados y emisiones de gases de efecto invernadero. Con la implementación de los sistemas de recuperación de biogás, los rellenos sanitarios generan un recurso potencial de metano CH_4 como gas combustible.

La captura y aprovechamiento de biogás en los rellenos sanitarios y el incremento de la revegetación, son prácticas tradicionalmente aplicadas en la gestión de residuos con el fin de mitigar la degradación del medio ambiente circundante, lo cual además proporciona un recurso de biomasa para la producción de energía. La biomasa puede ser convertida en bioenergía a través de varios procesos incluyendo la pirolisis, la licuefacción y la gasificación. [13]

Tabla 3. Metano producido y electricidad generada de rellenos sanitarios, adaptado de [13].

Nombre del relleno	Ubicación	Área [ha]	Producción de metano $\left[\frac{\text{Mg}}{\text{año}}\right]$	Electricidad neta $\left[\frac{\text{MW}}{\text{año}}\right]$
Ruseifeh	Amman, Jordania	54	1856	1980
Mugga	Territorio de la capital australiana	123	1545	7641
Tythegston	Wales, UK	9	484	2392
Buckden	Buckden, UK	5	787	3893
Wanford	Becdes, UK	13	402	1986
Pilsworth	Pilsworth, nor-oeste UK	76	2592	12821
Rainham	Runham, Este, UK	177	4816	23817
Ano liossia	Ano Liossia, Grecia	45	26629	131698
High heavens	High Wycombe, sur-este, UK	6	771	3814
Brookhurst	Warnham, sur-este, UK	7	2002	9902
Deep moor	Warnham, sur-oeste, UK	44	783	3873
Plessis-gassot	Ile-de-francia, Francia	250	3027	14971
Barycz	Krakow, Polonia	36	451	2232
Bradley	California, Estados Unidos	69	2737	13536
Central disposal	Iowa, Estados Unidos	78	1603	7927
El sobrante	California, Estados Unidos	200	1546	7648
Mill seat	Nueva York, Estados Unidos	156	1485	7343
Springhill	Florida, Estados Unidos	41	1335	6604
Butterfield	Arizona, Estados Unidos	389	28	140
Rautenweg	Wien, Austria	58	2461	12172
Siggerwiesen	Salzburg, Austria	50	1272	6293

La capacidad de los motogeneradores que funcionan con combustible a partir de biogás de relleno sanitario, van desde 0,3 a 4 MW. La Tabla 3 muestra el potencial de generación de metano y electricidad en algunos rellenos sanitarios. Actualmente la planta más grande se encuentra ubicada en el relleno sanitario Puente Hills cerca a los Ángeles California, donde el biogás es aprovechado en un generador de vapor para obtener una potencia de 50 MW. [11]

Algunos países de la Unión Europea como Suiza, Alemania, Holanda, Suecia, Austria, Dinamarca y Bélgica han reportado una disminución en la cantidad de rellenos sanitarios abiertos, cercana al 5% desde el año 2009 debido al aumento de las tasas de impuestos asociados a la práctica. Las emisiones de metano a nivel mundial asociadas al vertido de residuos han sido estimadas por la *Environmental Protection Agency- EPA* con una media de $8,7 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$. La Tabla 4 expone por continentes estos valores. [13] [14]

Tabla 4. Estimación de las emisiones mundiales de metano de rellenos, adaptado de [13].

continente	Emisiones de CH ₄ $\cdot 10^3 \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$	Potencial de electricidad generada a partir del biogás $\left[\frac{\text{GWh}}{\text{año}} \right]$
Asia	5452	27000
Europa	813	2042
América	2358	11660
Australia y Oceanía	102	504
Total	8725	41206

Las emisiones de metano de rellenos sanitarios es una de las causas del alarmante incremento de la concentración de metano en la atmósfera, las cuales desde 1990 es 1,72 ppm en volumen, ligeramente más del doble de los valores estimados en el año 1750. Estas emisiones corresponden entre un 6 y un 13% de las emisiones totales mundiales antropogénicas y no antropogénicas, según la *EPA*. Según el *Intergovernmental Panel on Climate Change- IPCC*, para el año 1992 se situaba este intervalo entre 8 y 20%.

El ritmo de crecimiento anual de las emisiones de gases efecto invernadero producto de los rellenos sanitarios es estimado en 0,9%. Este crecimiento es debido fundamentalmente a emisiones de origen antropogénico, las cuales constituyen alrededor del 70% del total de emisiones de metano en la atmósfera. [15]

El metano revalorizado mediante su captación y aprovechamiento energético en la actualidad supone un 0,06% de las emisiones totales de metano a la atmósfera. La Tabla 5 resume la producción de metano recuperado de un total de 248 plantas ubicadas en Estados Unidos y Europa. Otros autores elevan la cifra de las instalaciones de recuperación de biogás hasta en 481.

Esta discrepancia puede deberse a que en estas cifras se incluyen también aquellas plantas en que el biogás es solamente extraído e incinerado en antorchas, sin que en caso alguno se realice algún proceso de recuperación energética [16].

Aunque no todas las plantas de recuperación de biogás utilizan éste como combustible para la generación de energía eléctrica, se puede hacer una idea de la importancia del biogás como fuente de generación de energía a nivel mundial si se proyecta que los $1250 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$ de metano revalorizados a nivel mundial equivalen, supuesto un rendimiento eléctrico del 33%, a una potencia de 444 [MW] eléctricos, es decir, el equivalente a una central térmica [13].

Tabla 5. Potencial de recuperación energética de metano en el mundo. [16]

País	Número de plantas	$CH_4 \cdot 10^6 \left[\frac{m^3}{año} \right]$	$\cdot 10^3 \left[\frac{tep}{año} \right]$
EE.UU	79	843	746
Alemania	80	149	132
UK	27	127	112
Holanda	10	19,5	17,2
Canadá	9	6,5	5,7
Suecia	8	12,0	10,6
Italia	7	11,3	10
Dinamarca	5	4,1	3,6
Francia	5	4,7	4,15
España	3	21,9	19,3
Otras	15	51,2	45,3
Total	248	1250	1116

Nota. Las unidades tep corresponden a tonelada equivalente de petróleo.

2.3 PLANTAS DE INCINERACIÓN CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA

Se define la incineración de residuos como la oxidación de las materias combustibles contenidas en los residuos. Los RSU son heterogéneos, consistentes fundamentalmente en sustancias orgánicas, minerales, metales y agua. Durante el proceso de incineración se crean gases de combustión que contienen la mayoría de la energía disponible en forma de calor. Las sustancias orgánicas se destruyen al alcanzar la temperatura de ignición y estar rodeadas de oxígeno. Cuando el poder calorífico del combustible y el suministro de oxígeno necesario para la reacción es suficiente, se produce una reacción térmica en cadena y una combustión autoalimentada, es decir, que no es necesario inyectar otros combustibles para mantener la reacción de combustión. [17]

El objetivo de la técnica *WtE* de la incineración, es reducir el volumen de los residuos sólidos y su peligrosidad, concentrando o destruyendo las sustancias altamente tóxicas. El proceso de incineración también puede proveer un medio para recuperar energía a partir de los residuos. A continuación se presenta la clasificación de la incineración de acuerdo al tipo de residuo tratado. La información presentada es adaptada de [18].

2.3.1 Estado del arte técnica de incineración

Alrededor del mundo se han construido plantas térmicas que incineran RSU con el objetivo de reemplazar la quema directa de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y sus derivados. Algunos estudios de plantas de incineración de RSU con recuperación energética se exponen a continuación.

Estudio: Calculation of first-law and second-law-efficiency of a Norwegian combined heat and power facility driven by municipal waste incineration – A case study [19].

País: Noruega.

Conclusiones: se evalúan varios métodos para calcular la eficiencia energética por medio de la implementación de una planta térmica con recuperación energética alimentada por RSU para el caso de Noruega. Se calcula la eficiencia de segunda ley correspondiente al 17,3% de la planta y comparan los valores reales con los arrojados por las correlaciones teóricas. Finalizan concluyendo que los gases productos de la combustión pueden ser implementados para aumentar la eficiencia energética de la planta y proponen la investigación como un estudio a futuro.

Estudio: Incineration of municipal solid waste in Malaysia: Salient issues policies and waste-to-energy initiatives [20].

País: Malasia.

Conclusiones: se evalúa la composición de los RSU de Malasia y se analiza el funcionamiento de una planta piloto ubicada en *Pangkor Island*. Los resultados son satisfactorios y se discute la opción de implementar la planta de incineración a gran escala. Resaltan la necesidad de la formación cultural para aceptar las técnicas de incineración estrictamente controlada ya que con la tecnología actual no representa ningún peligro para el medio ambiente, siempre y cuando las políticas de administración sean claras y organizadas. Concluyen que es una excelente opción a futuro para implementar como energía renovable en Malasia siempre y cuando la viabilidad técnica y financiera lo permita.

Estudio: The composition, heating value and renewable share of the energy content of mixed municipal solid waste in Finland [21].

País: Finlandia.

Conclusiones: se estudia la composición de los RSU en la región de *South-Karelia*, se determina el poder calorífico de los RSU. El principal objetivo fue entender la contribución de los RSU para la producción de energía eléctrica mediante el proceso de incineración con recuperación energética. El análisis de los RSU en la ciudad de *Lappeenranta* arroja como resultados un poder calorífico inferior igual a $19 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$. En este estudio concluyen que el contenido de residuos orgánicos disminuye la eficiencia térmica en el proceso de incineración y que el valor obtenido en la ciudad de *Lappeenranta* es particularmente alto debido a que allí separan los residuos orgánicos de los inorgánicos antes de proceder a la incineración. Finalmente concluyen que el reciclado es beneficioso en algunos casos, pero la separación de los RSU debe ser tomada en cuenta en los hornos de incineración y el efecto que los RSU reciclados causan en las emisiones de gases de efecto invernadero liberados a la atmósfera para futuros diseños.

Estudio: Municipal solid waste (MSW) as a source of renewable energy in Bangladesh: Revisited [22].

País: Bangladesh.

Conclusiones: en este artículo se estudia la implementación de la incineración de RSU en plantas térmicas con recuperación energética como energía renovable en mega ciudades de Bangladesh. Hacen especialmente énfasis en la importancia de generar electricidad a partir de los RSU como energía renovable y solucionar el problema de la disposición final de los RSU. Se estima la composición de los RSU teniendo como resultado general 74,6% residuos orgánicos, 9,1% papel y 3,5% plásticos. Obtienen como resultado que la generación de electricidad en las seis ciudades principales es de 186408 kWh/día a partir de la incineración de RSU con recuperación de biogás.

Estudio: Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil [23].

País: Brasil.

Conclusiones: el estudio evalúa la hipótesis de implementar una planta térmica que funcione a partir de biogás de síntesis captado de relleno sanitario y la opción de incineración de los RSU en Brasil para tres ciudades cuyas poblaciones corresponden a cien mil, medio millón y 1 millón de habitantes, tomando como referencia la composición de los RSU de la ciudad de Belo Horizonte. Este estudio resalta la importancia financiera de desarrollar proyectos de tal magnitud tecnológica y el compromiso de políticas determinantes en el proceso como el protocolo de Kyoto. Expone los beneficios sociales que traen los proyectos relacionados con la incineración de RSU con recuperación energética, principalmente para los sectores de escasos recursos. Resalta que a futuros trabajos sería interesante explorar técnicas como la gasificación y pirolisis de RSU. Concluye que a futuro la incineración es una gran alternativa como fuente renovable de energía.

Estudio: Municipal solid waste and production of substitute natural gas and electricity as energy alternatives [24].

País: Chile.

Conclusiones: Se hace un análisis comparativo que evalúa la opción de implementar una planta térmica que funcione a partir de biogás captado para generar electricidad y la opción de incinerar RSU con recuperación energética. Los resultados muestran que los rellenos generan suficiente biogás para ser captado y expone políticas públicas que se deben implementar para hacer viable la implementación de dichas técnicas debido a que el principal inconveniente es la viabilidad económica. Sin embargo resalta que es una excelente opción de disposición final de los RSU y es viable técnicamente la implementación de esta técnica como fuentes de energías renovables.

Estudios desarrollados en Ghana [25], India [26], Irak [27], Taiwán [28] y otros países, arrojan resultados similares, concluyendo en general que las técnicas de incineración de RSU con recuperación energética, al igual que la generación de electricidad a partir del aprovechamiento del biogás, son una gran opción frente a la problemática de la disposición final de los residuos, teniendo como beneficios la disminución de impactos ambientales asociados a la mitigación del calentamiento global debido a la no liberación de metano a la atmósfera y la importancia económica y de implementar de políticas públicas que fortalezcan las fuentes de energías no convencionales.

2.4 ESCENARIOS TÉCNICOS DE ESTUDIO

A continuación se presentan las ciudades en las que se realizaron los casos de análisis para las técnicas de aprovechamiento de biogás e incineración de acuerdo a las características de cada una.

La selección de los escenarios técnicos de estudio se realizó teniendo en cuenta la variación de la altura de las ciudades con respecto al nivel del mar, el nivel de pluviosidad para cada región y el número de habitantes de cada ciudad, siendo San Andrés una ciudad pequeña ubicada a nivel del mar; Pereira una ciudad intermedia ubicada a 1400 metros sobre el nivel del mar y Bogotá una metrópolis de 10 millones de habitantes ubicada a 2600 metros sobre el nivel del mar.

2.4.1 Escenario técnico 1

La ciudad de San Andrés isla fue seleccionada para realizar el escenario de estudio ya que se encuentra ubicada a nivel del mar, los niveles de pluviosidad varían de acuerdo a la temporada de lluvias y es una ciudad pequeña de Colombia. No obstante ya que San Andrés es una isla, dispone de poco espacio para depositar los residuos sólidos y por tal motivo se construyó una planta de incineración de residuos sólidos urbanos con recuperación energética. Por estas razones se realizó un estudio termodinámico del modelo de incineración implementado con el fin de proponer mejoras de proceso. [7]

SAN ANDRÉS ISLA

La isla de San Andrés tiene una población estimada en setenta mil habitantes y cuenta con un relleno sanitario (*Magic Garden*) el cual posee una superficie de ocho hectáreas aproximadamente. El relleno sanitario se encuentra en la cuesta oeste de la Isla de San Andrés, cerca de San Luis. La disposición final de residuos sólidos urbanos en el relleno se realiza desde el año de 1985. Las antiguas secciones del relleno están clausuradas y abarcan una superficie territorial de 2,8 hectáreas aproximadamente. La caracterización de los RSU de la ciudad de San Andrés se expone en la Figura 4. [7]

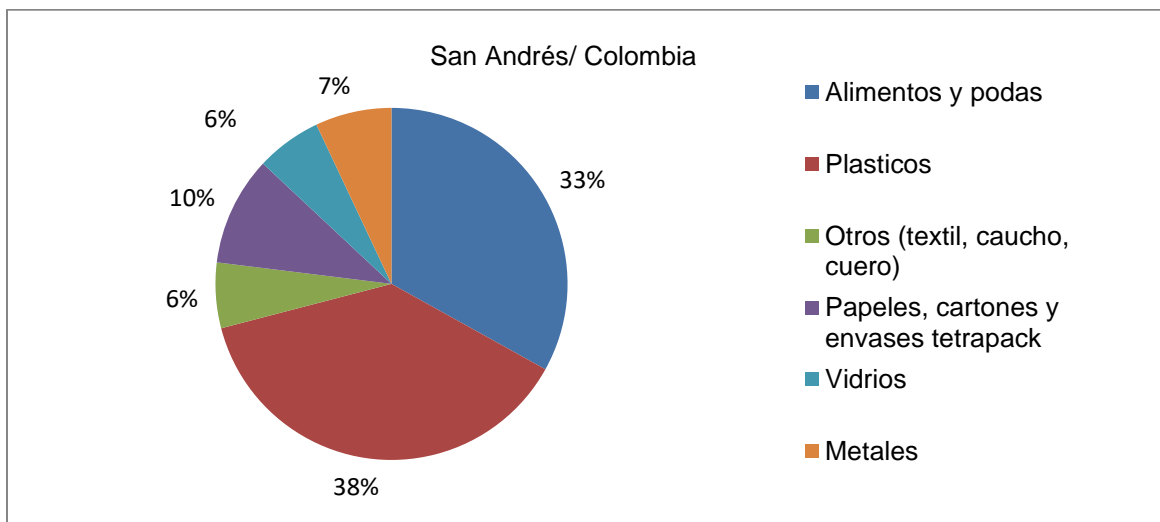


Figura 4. Resultados caracterización RSU del relleno sanitario *Magic Garden*. [7]

El gas producido en el relleno sanitario se libera de forma pasiva a través de pozos verticales de biogás. El agua superficial de la periferia se desvía hacia el mar a través de un sistema de dos tubos de desagüe. [7] [29] [30]

La planta de incineración con recuperación energética opera mediante un ciclo termodinámico tipo Rankine diseñado para generar 1,4 [MW]. En el capítulo 3 se analizará la planta térmica mediante la simulación en el software *Engineering Equation Solver- EES*; los valores utilizados en la simulación fueron suministrados por la Sociedad Productora de Energía de San Andrés y Providencia-SOPESA S.A ESP. La Figura 5 muestra una representación de la planta *WtE* de la ciudad de San Andrés. [7] [29] [30]

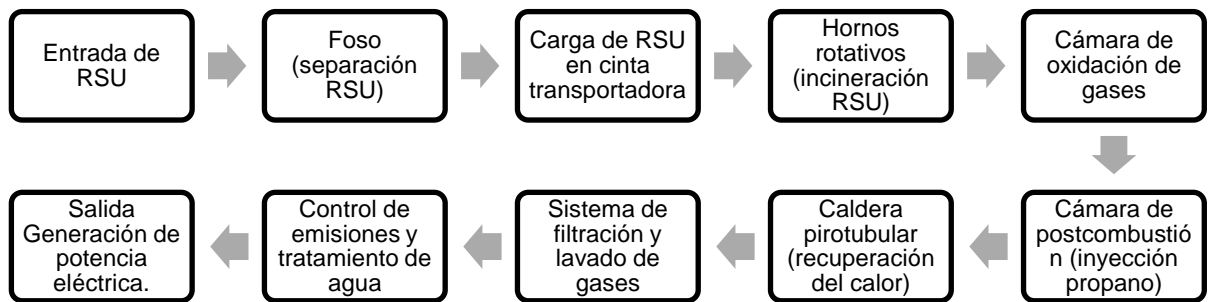


Figura 5. Representación de la planta *WtE* de San Andrés Colombia [7].

2.4.2 Escenario técnico 2

Este escenario se plantea para la ciudad de Bogotá que se encuentra a 2600 metros sobre el nivel del mar y una población cercana a los 10 millones de habitantes incluyendo su área metropolitana [1]. Se propone estudiar la técnica de combustión combinada entre el biogás y los RSU, como alternativa al funcionamiento de la planta *WtE* del relleno Doña Juana, con el fin de aprovechar energéticamente el biogás captado de relleno sanitario como sustituto del gas natural en las cámaras de incineración. Se espera que con esta alternativa, la planta aumente un poco la eficiencia en la generación de energía. [31]

BOGOTÁ- CUNDINAMARCA

El Distrito Capital de Colombia cuenta con el relleno sanitario de Doña Juana, donde se disponen los residuos de seis municipios estimados en $5892 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]$, de los cuales Bogotá aporta $5880 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]$. [9]

El relleno sanitario está localizado en la localidad 19 de Ciudad Bolívar, al sur de la sabana de Bogotá; el área actual del relleno sanitario Doña Juana es de 500 [ha]. De éstas, 150 [ha] han sido destinadas a la disposición de residuos, las cuales están repartidas en ocho zonas, donde se han desarrollado o están en proceso de desarrollo las etapas de disposición de los residuos hospitalarios. [32]

El relleno sanitario Doña Juana fue inaugurado el 1 de noviembre de 1988, la vida útil del relleno sanitario fue proyectada a 20 años, pero después de 10 años de estar en funcionamiento ya presentaba fallas de operación, y cada vez se encuentra más cerca de los barrios circundantes del sur de la ciudad, ocasionando graves problemas para las autoridades sanitarias. Actualmente el relleno presenta diversos problemas, tales como la proliferación de malos olores, vectores como moscas y roedores, debido a la exposición de RSU que no son cubiertos a tiempo, volúmenes de lixiviados superiores a la capacidad de la planta de tratamiento de los mismos, e inclusive deslizamiento de los residuos depositados. A causa de estos problemas, las comunidades aledañas se han visto afectadas reportando tierras menos fértiles e infección del ganado. [33]

Inicialmente para el relleno sanitario Doña Juana se tenía un estimado de vida útil hasta octubre del 2012. Sin embargo, su clausura ha venido siendo pospuesta ya que cuenta con posibles áreas de expansión. En la actualidad el relleno sanitario Doña Juana está en funcionamiento y es operado por el centro de gerenciamiento de residuos -CGR- Doña Juana S.A E.S.P, el frente de disposición es en la terraza 1, zona de optimización fase II, con una vida útil hasta el 2022. [34]

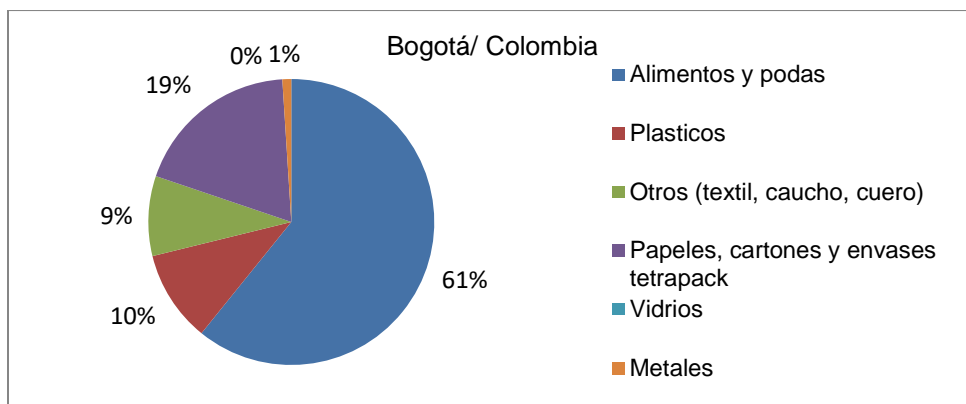


Figura 6. Resultados caracterización RSU del relleno sanitario *Doña Juana*. [32]

El operador del relleno sanitario Doña Juana es el encargado de realizar la caracterización de los RSU mensualmente. La caracterización de los RSU se presenta en la Figura 6.

2.4.3 Escenario técnico 3

Se seleccionó como escenario de estudio la ciudad Pereira- Risaralda y su relleno sanitario La Glorita ya que es una ciudad ubicada a 1400 metros sobre el nivel del mar y una población aproximada a los 700000 habitantes, teniendo en cuenta sus zona metropolitana. Los niveles de pluviosidad son aproximadamente 2100 mm por año. Para este escenario se estudió la técnica de la captación de biogás con recuperación energética.

PEREIRA-RISARALDA

Pereira dispone sus residuos en el relleno sanitario regional La Glorita, corregimiento de Combia Baja, a 14 km del casco urbano de la ciudad. En éste un total de 17 municipios descargan sus residuos, y la ciudad aporta alrededor de $280 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]$, de las $650 \left[\frac{\text{ton}}{\text{día}} \right]$ que se disponen en el relleno sanitario [35].

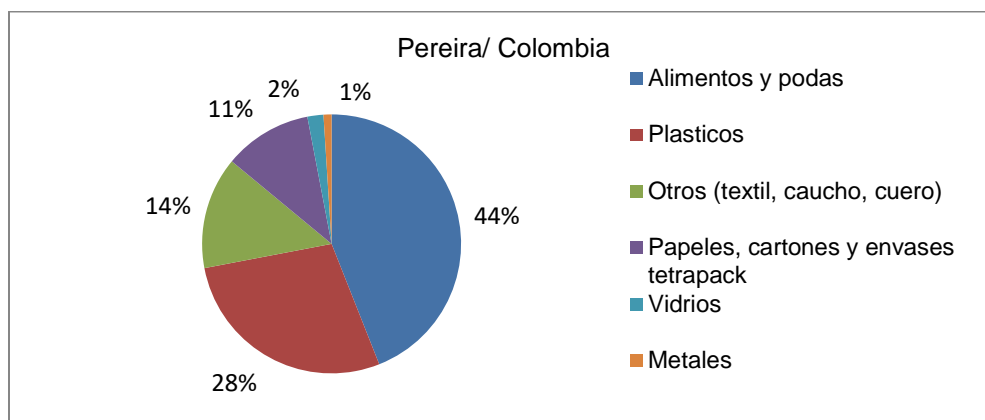


Figura 7. Resultados caracterización RSU del relleno sanitario La Glorita. [36]

La apertura del relleno sanitario fué en 1997 y se proyecta el año de clausura en el 2033. La Glorita, está ubicado a una altura de 1423 m sobre el nivel del mar, con una temperatura media de 21°C. El Municipio de Pereira Reservó un área de 327[ha], localizada en la vertiente norte del río Otún para el relleno sanitario. En promedio los residuos que ingresan al relleno sanitario La Glorita tienen una humedad de 76%, relacionado con la fracción orgánica. La caracterización de los RSU se presenta en la Figura 7. La densidad promedio de los RSU medidos se estableció en $335 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ y el peso específico en $5341 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right]$.

3. INCINERACIÓN CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA

En este capítulo se presentan los resultados del escenario técnico¹, que consiste en la evaluación de la técnica de incineración con recuperación energética para la planta *WtE* del relleno *Magic Garden* de la ciudad de San Andrés isla. Este análisis presenta el estado del arte, las etapas del proceso de incineración, los mecanismos de simulación implementados para determinar el poder calorífico de los residuos y el análisis termodinámico. Igualmente se presentan los resultados del escenario técnico 2, que comprende la evaluación de la técnica de incineración *cofiring* con recuperación energética para el relleno Doña Juana de la ciudad de Bogotá. En este escenario, se propone estudiar la técnica *cofiring* entre la incineración de RSU y la inyección de biogás al 50% de metano aproximadamente.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA WtE DE SAN ANDRÉS

La información acá presentada fue obtenida mediante visita técnica y del personal del área técnica encargado de la gestión y administración de la planta. La planta se compone de las siguientes etapas:

- Disposición de residuos sólidos entrantes.
- Pretratamiento de residuos.
- Carga de residuos en el proceso.
- Tratamiento térmico de los residuos.
- Etapa de recuperación y conversión de energía.
- Lavado de gases de combustión.
- Monitorización y control de emisiones.
- Control y uso de agua para proceso.
- Gestión y tratamiento de cenizas/cenizas de fondo (de la etapa de combustión).

La planta de incineración está diseñada para trabajar continuamente; está instrumentada y se opera desde un cuarto de control ubicado dentro de las instalaciones del relleno sanitario. A continuación se describe brevemente el funcionamiento de la planta, según cada una de las etapas del proceso presentadas anteriormente. [7]

3.1.1 Disposición de residuos sólidos entrantes

Los residuos sólidos de la isla de San Andrés son recogidos mediante camiones compactadores. Los camiones compactadores depositan los RSU en el relleno *Magic Garden* el cual se encuentra a 50 metros aproximadamente del foso de clasificación de los residuos sólidos para proceder a ser incinerados. En el relleno sanitario es posible encontrar materiales de desecho de residuos comerciales e industriales y algunos residuos peligrosos. La Figura 8 muestra la zona donde actualmente se depositan los RSU de la isla.



Figura 8. Zona de recepción de los RSU de San Andrés.

3.1.2 Pretratamiento de residuos

Los RSU son transportados desde la zona de recepción hasta el foso de separación. La separación en el foso es realizada por personal contratado por la empresa operadora de la planta de incineración. El pretratamiento consiste en separar los RSU inertes como huesos, vidrios y metales, los cuales no aportan al poder calorífico de los residuos y genera problemas en el interior del horno por acumulación de impurezas, diferentes a las cenizas de combustión. En esta etapa los RSU que poseen grandes tamaños, son triturados con el fin de posteriormente alimentar el horno de incineración con piezas más pequeñas que tengan un tamaño adecuado con la abertura de alimentación. La Figura 9 muestra el foso de separación (también llamado bunker acumulador).



Figura 9. Foso de pretratamiento de los RSU planta WtE de San Andrés.

3.1.3 Carga de residuos en el proceso

Los residuos son tomados por un brazo mecánico como se ilustra en la Figura 9 y son depositados en una banda transportadora que se encarga de alimentar los hornos de incineración. La planta de incineración fue diseñada con el fin de procesar 80 toneladas de RSU al día, mediante el uso de dos hornos de incineración, denominados horno norte y horno sur. La incineración de los RSU es realizada en dos hornos del tipo rotativo como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Horno rotativo de RSU planta RSU de San Andrés.

El tiempo de residencia de los RSU en cada horno está determinado por la (Ec. 1). [37]

$$t = \frac{19 \cdot \frac{L}{D} \cdot \alpha^{0.5} \cdot F}{I(\%) \cdot N} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde cada término de la ecuación es:

t : tiempo de residencia [min];

L : longitud del horno [m];

D : diámetro del horno [m];

α : ángulo dinámico de reposo;

F : factor de carga;

I : inclinación del horno [%];

N : velocidad de rotación del horno [rpm].

Reemplazando cada una de las variables en la (Ec. 1) con los valores de la planta de San Andrés, se obtiene:

$$t = \frac{19 \cdot 2,4 \cdot 10^{0.5} \cdot 1}{3 \cdot 2} \approx 24 \text{ [min]}$$

Posteriormente los gases van a una cámara de oxidación con el fin de destruir especies como dioxinas y furanos, procedimiento previo al paso por la cámara de postcombustión en la que se inyecta gas propano y se eleva la temperatura hasta 1250°C.

3.1.4 Etapa de recuperación y conversión de energía

En el proceso de incineración se genera un calor procedente de la combustión de los RSU ya que el fenómeno está dominado por una reacción exotérmica. La energía liberada es transferida a los gases de combustión y la recuperación de calor se realiza mediante una caldera. La Figura 11 muestra el generador de vapor pirotubular de la planta.



Figura 11. Generador de vapor pirotubular de la planta RSU de San Andrés.

3.1.5 Lavado de gases de combustión

El proceso de lavado de gases de combustión se compone de varios dispositivos que en conjunto proporcionan un sistema de tratamiento global de los gases de combustión. La Figura 12 muestra el sistema de lavado de gases de la planta de incineración de San Andrés.



Figura 12. Sistema de lavado de gases planta RSU de San Andrés.

3.1.6 Monitorización y control de emisiones

La planta de incineración monitorea y controla el ácido clorhídrico, los dióxidos de azufre, los óxidos nitrosos, el monóxido de carbono, el oxígeno y el material particulado, mediante un monitoreo continuo de emisiones como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Sistema de control de emisiones de la planta RSU de San Andrés.

3.1.7 Control y uso de agua para proceso

La planta de incineración de RSU está alimentada por agua proveniente de lluvias almacenada en recipientes como se muestra en la Figura 14, la cual es utilizada para la generación de vapor del ciclo termodinámico.



Figura 14. Sistema de control y uso de agua para proceso, planta RSU de San Andrés.

3.1.8 Gestión y tratamiento de cenizas/cenizas de fondo

El proceso de incineración de RSU produce varios tipos de residuos sólidos y material particulado procedente de la combustión directa o del filtrado y lavado de gases. Este tipo de residuos usualmente es ceniza fina, productos de la reacción y aditivos sin reaccionar. Las cenizas de la planta de incineración de San Andrés son recogidas y almacenadas en contenedores para ser tratada con yeso y cal.

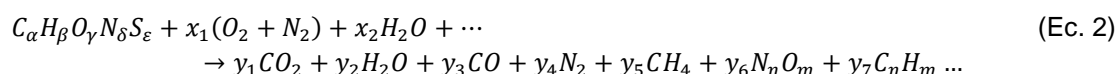
3.2 EVALUACIÓN DEL ESCENARIO TÉCNICO 1

El modelo termodinámico se desarrolló en dos partes. La primera parte corresponde con la determinación del poder calorífico del combustible, que en este caso corresponde a los RSU previamente caracterizados; para ello se utilizan correlaciones experimentales sugeridas en la literatura y se expone un modelo de cinética química.

La segunda parte consiste en desarrollar un modelo de energía a partir de la primera ley de la termodinámica. Finalmente se presentan los resultados. El anexo 1 muestra la descripción completa de la planta.

3.2.1 Cálculo del PCI de los RSU del relleno sanitario *Magic Garden*

La reacción de combustión se modeló siguiendo la metodología propuesta en [38], siguiendo la caracterización de los RSU presentada en la Tabla 6, como se indica en la Figura 15. El combustible fue caracterizado con base en su composición elemental y se realizó equilibrio químico como se presenta en la (Ec. 2). [39] [40] [38]



Siendo los coeficiente x_n y y_n aquellos resultantes del balance químico de la reacción.

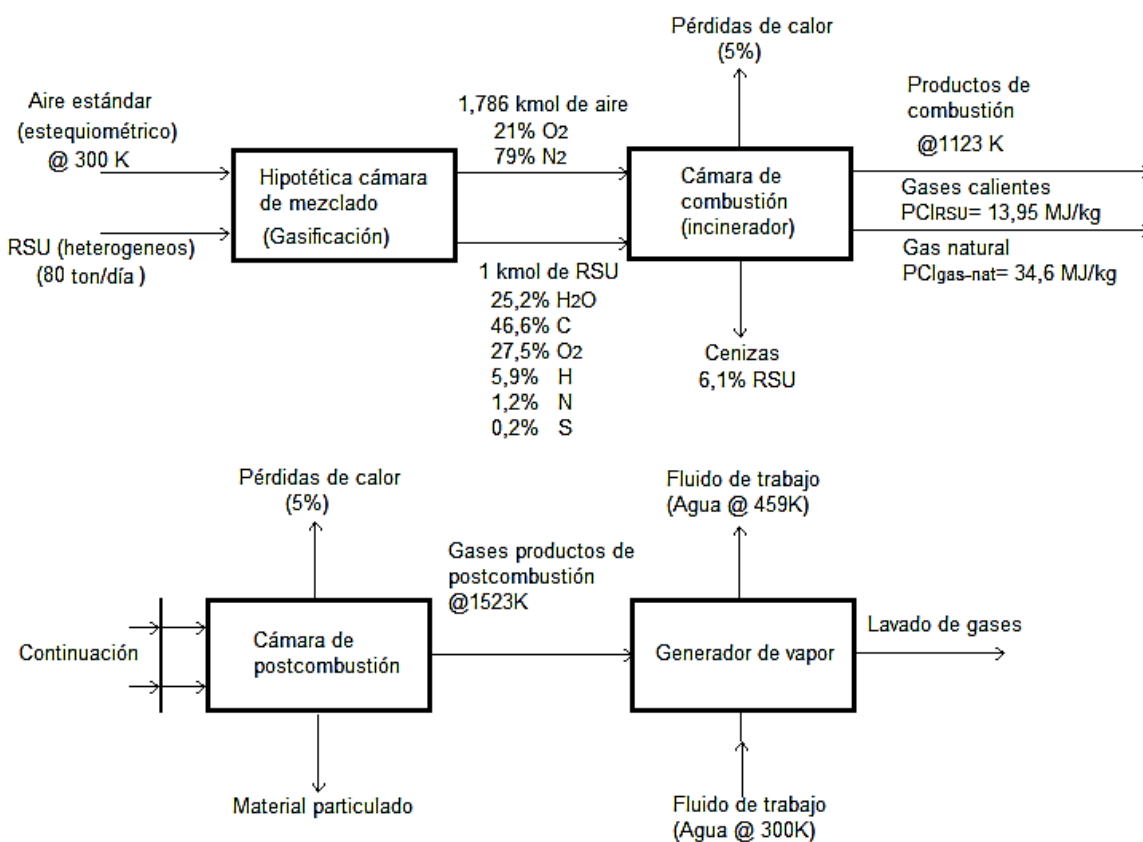


Figura 15. Proceso de combustión de RSU.

Tabla 6. Caracterización RSU del relleno sanitario *Magic Garden*, adaptado de [7] [41] .

Tipo	% RSU	% H ₂ O	% C	% H	% O	% N	% S	% Ash
Alimentos	30,9	70,0	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel	8,0	6,0	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Plásticos	37,8	2,0	60,0	7,2	22,8	0,0	0,0	10,0
Textiles	6,5	10,0	55,0	6,6	31,2	4,6	0,2	2,5
Maderas	2,2	20,0	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
Podas	2,0	60,0	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5
Inertes	12,6	-	-	-	-	-	-	-
Promedio		25,2	46,6	5,9	27,5	1,2	0,2	6,1

A continuación, se estima el poder calorífico superior de los RSU para el proceso mostrado en la Figura 15, mediante las correlaciones de Lloyd y Davenport (Ec. 3), Laura Meraz (Ec. 4), Boie (Ec. 5) y Wilson (Ec. 6) [38] [41]. Las correlaciones son:

Según Lloyd y Davenport:

$$PCS = \left(\frac{1 - \%H_2O}{100} \right) \cdot (-0,3578 \cdot \%C - 1,1357 \cdot \%H + 0,0845 \cdot \%O - 0,0594 \cdot \%N - 0,1119 \cdot \%S) \cdot (-1000) \quad (\text{Ec. 3})$$

Según Laura Meratz:

$$PCS = \left(\frac{1 - \%H_2O}{100} \right) \cdot (-0,3708 \cdot \%C - 1,1124 \cdot \%H + 0,1391 \cdot \%O - 0,3178 \cdot \%N - 0,1391 \cdot \%S) \cdot (-1000) \quad (\text{Ec. 4})$$

Según Boie:

$$PCS = \left(\frac{1 - \%H_2O}{100} \right) \cdot (-0,3517 \cdot \%C - 1,1625 \cdot \%H + 0,1109 \cdot \%O - 0,0628 \cdot \%N - 0,1109 \cdot \%S) \cdot (-1000) \quad (\text{Ec. 5})$$

Según Wilson:

$$PCS = \left(\frac{1 - \%H_2O}{100} \right) \cdot (-0,3279 \cdot \%C - 1,533 \cdot \%H + 0,1668 \cdot \%O - 0,0242 \cdot \%N - 0,0928 \cdot \%S) \cdot (-1000) \quad (\text{Ec. 6})$$

Las especies presentadas en las correlaciones son: carbono, hidrogeno, oxigeno, nitrógeno y azufre. Esto implica que los RSU se deben caracterizar elementalmente teniendo en cuenta estas especies, como se puede apreciar en la Tabla 6. La caracterización elemental se realiza en base seca, por tal razón, sumando la fracción de humedad no se considera en el 100%, como se propone en [41]. La fracción de residuos orgánicos en el relleno sanitario *Magic Garden* que corresponde a los alimentos (30%) es menor en comparación con el promedio nacional (50 a 60%). Esto implica que la humedad presente en el incinerador es menor, aumentando el poder calorífico. La

Tabla 7 muestra los resultados del PCI estimado de los RSU del relleno *Magic Garden*.

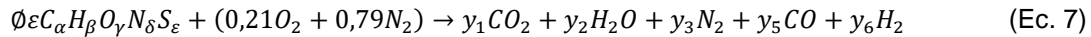
Tabla 7. Resultados del PCI estimado de los RSU del relleno sanitario *Magic Garden*.

Correlación	Ecuación	PCS $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	PCI $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
Lloyd y Davenport	(Ec. 3)	15791	14506
Laura Meratz	(Ec. 4)	15254	13970
Boie	(Ec. 5)	15156	13871
Wilson	(Ec. 6)	14720	13436
Promedio		15230	13946

El poder calorífico estimado en promedio fue de 13,9 MJ/kg, un valor acorde al encontrado en la literatura. [21]

ANÁLISIS DE EQUILIBRIO QUÍMICO

Según la metodología utilizada para analizar el fenómeno de incineración, se procedió a simular los RSU mediante la caracterización elemental y la degradación térmica mediante gasificación como se muestra en la Figura 15. Ya que las mezclas de gases tienden al equilibrio químico cuando las condiciones externas son mantenidas constantes y el tiempo de permanencia es suficientemente largo. Se considera que la reacción de combustión se da mediante el mecanismo que se presenta en la (Ec. 7).



Donde ε es el número de moles de combustible necesarios para reaccionar con 1 kmol de aire seco estándar. La composición de los productos en función del número de moles de $y_5 CO$ se presenta de la (Ec. 8) a la (Ec. 11).

$$y_1 = \emptyset \varepsilon \alpha - y_5 \quad (\text{Ec. 8})$$

$$y_2 = 0,42 - \emptyset \varepsilon (2\alpha - \gamma) + y_5 \quad (\text{Ec. 9})$$

$$y_3 = 0,79 + \emptyset \varepsilon \frac{\delta}{2} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$y_6 = 0,42(\emptyset - 1) - y_5 \quad (\text{Ec. 11})$$

Para la reacción de equilibrio agua gas se obtiene la (Ec. 12).



A partir de la (Ec. 12), la constante de equilibrio k_p en el intervalo $300 \text{ K} < T < 3200 \text{ K}$ en el cual sucede el fenómeno de la reacción de combustión, puede ser aproximada mediante la (Ec. 13).

$$\ln k_p = 2,743 - \frac{1,761}{\frac{T}{10000}} - \frac{1,611}{\left(\frac{T}{10000}\right)^2} + \frac{0,2803}{\left(\frac{T}{10000}\right)^3} \quad (\text{Ec. 13})$$

De la reacción de equilibrio agua-gas presentada en la (Ec. 12) se verifica la constante de equilibrio k_p como se muestra en la (Ec. 14).

$$k_p = \frac{y_2 \cdot y_5}{y_1 \cdot y_6} \quad (\text{Ec. 14})$$

Sustituyendo las expresiones para y_1 , y_2 y y_6 se obtiene la (Ec. 26).

$$ay_5^2 + by_5 + c = 0 \quad (\text{Ec. 15})$$

Solucionando el sistema de ecuaciones presentado se obtiene:

$$a = 1 - k_p \quad (\text{Ec. 16})$$

$$b = 0,42 - \phi\epsilon(2\alpha - \gamma) + k_p[0,42(\phi - 1) + \alpha\phi\epsilon] \quad (\text{Ec. 17})$$

$$c = -0,42\alpha\phi\epsilon(\phi - 1)k_p \quad (\text{Ec. 18})$$

Los demás mecanismos de equilibrio químico son presentados en [38]. Otra forma de solucionar el problema, es mediante el uso del software *Gaseq* como se presenta en el capítulo 4.

El ciclo termodinámico de la planta *WtE* de San Andrés se muestra en la Figura 16. La energía recuperada varía según el tipo de residuos con los cuales se alimentan los hornos de incineración (composición, flujo másico, poder calorífico) y las características del ciclo termodinámico. La planta opera mediante un ciclo termodinámico tipo Rankine con regeneración. Las condiciones de operación se presentan en la Tabla 8.

La información fue obtenida a partir de una visita técnica a la planta. Los resultados de la simulación de la planta térmica se muestran en la Tabla 9. El código para realizar la simulación se presenta en el anexo 2, éste se realizó en el software *Engineering Equation Solver- EES*.

El rango de temperaturas promedio en el cual operan las plantas *WtE* oscila entre 370~450 °C, lo cual concuerda con la capacidad instalada en la planta de San Andrés. La investigación presenta que el rango de presiones de operación está entre 40~50 bar. Valores de presión superiores a 50 bar obliga que la cámara de combustión sea recubierta con un metal noble (que no reaccione) para evitar problemas de corrosión, lo cual implica aumentar los costos asociados a la construcción y mantenimiento de la planta. [42] [43]

La capacidad promedio de una planta *WtE* es de 55 MW_t y la potencia eléctrica generada es 15,7 MW_e, obtenidos con una presión del vapor a la entrada de la turbina igual a 43 bar y la temperatura igual a 390 °C. El sistema de enfriamiento usualmente se da mediante condensadores enfriados por agua a bajas presiones entre 0,1~0,2 bar. Finalmente los valores reportados de

eficiencia de primera ley para este tipo de plantas oscilan entre 25~30 % [44].

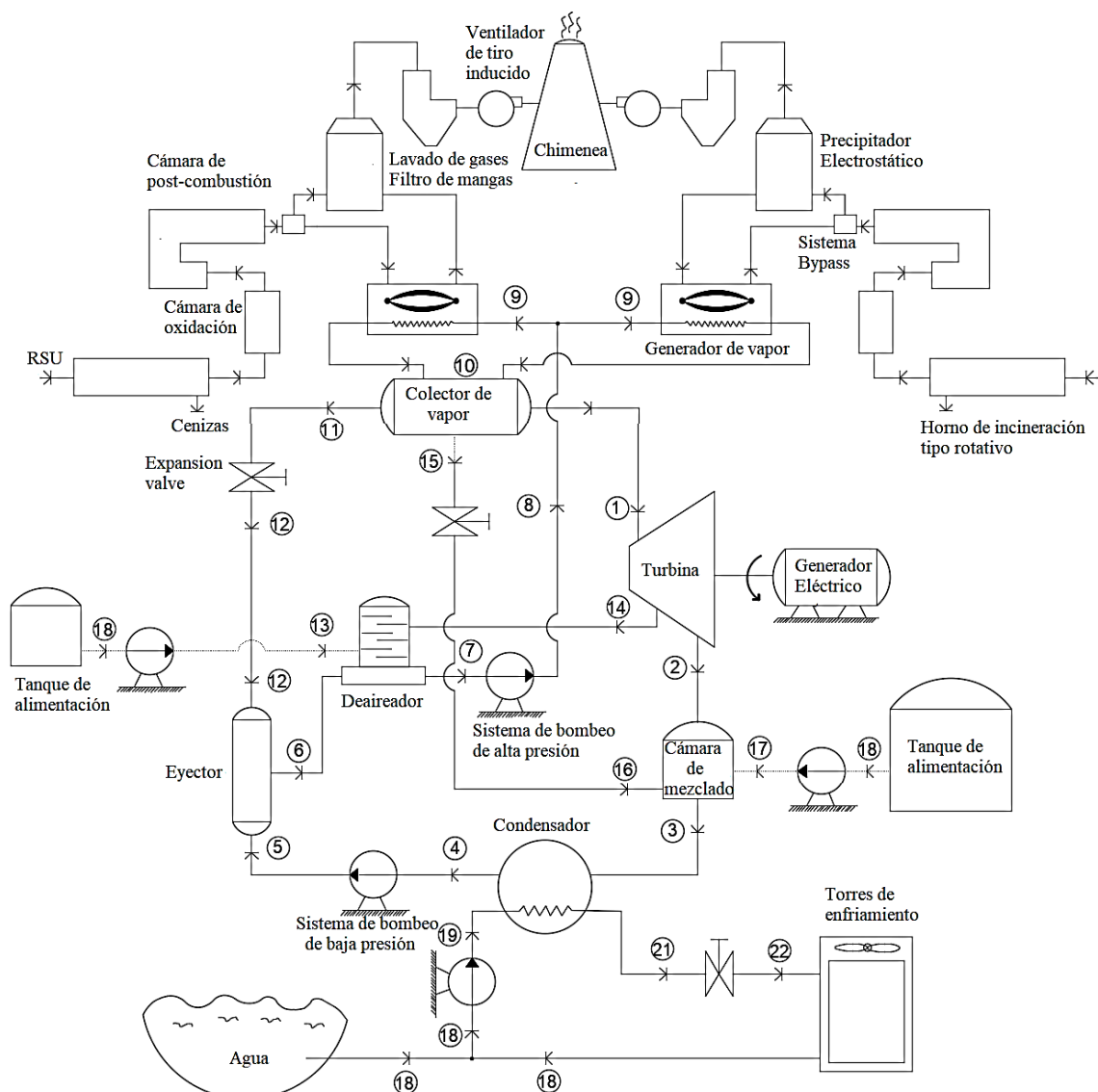


Figura 16. Diagrama termodinámico planta WtE de San Andrés- Colombia. (Autoría propia)

Tabla 8. Condiciones de operación planta WtE San Andrés.

Estado	Observaciones	P [kPa]	T [°C]	h $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	s $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	v $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right]$
1	Entrada turbina	1135	185,5	2782	6,542	0,1722
2	Entrada cámara de mezclado	10	45,82	2345	7,398	13,21
3	Entrada condensador	10	45,82	2345	7,398	13,21

Tabla 8. Condiciones de operación planta WtE San Andrés, continuación.

Estado	Observaciones	P [kPa]	T [°C]	h $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	s $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	v $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right]$
4	Entrada sistema de bombeo de primera etapa	10	45,82	191,8	0,151	0,001
5	Entrada eyector	130	45,82	191,9	0,649	0,00101
6	Entrada deaireador	195	107,5	451	1,391	0,00105
7	Entrada sistema de bombeo de segunda etapa	195	156,3	2782	7,322	1,00
8	Salida sistema de bombeo de segunda etapa-caudal total	1135	156,3	659,9	1,905	0,0011
9	Entrada al generador de vapor	1135	156,3	659,9	1,905	0,0011
10	Entrada al colector de vapor	1135	185,5	2782	6,542	0,1722
11	Extracción del colector de vapor-entrada válvula de expansión	1135	185,5	2782	6,542	0,1722
12	Extracción de vapor al eyector	245	158,3	2782	7,220	0,7969
13	Entrada de agua al deaireador	101,3	25	104,8	0,367	0,001003
14	Extracción de la turbina al deaireador	400	144,0	2739	6,898	0,4629
15	Extracción del colector de vapor al sistema Bypass	1135	185,5	2782	6,542	0,1722
16	Entrada del sistema bypass a la cámara de mezclado	10	149,9	2782	8,687	19,51
17	Entrada agua de alimentación a la cámara de mezclado	101,3	25	104,8	0,367	0,001003
18	Estado de referencia. Agua en condiciones ambientales	101,3	25	104,8	0,367	0,001003
19	Sistema de bombeo agua de mar para enfriamiento	300	25	105,0	0,367	0,001003

3.2.2 Análisis de energía planta WtE San Andrés

Para realizar el análisis de primera ley de la termodinámica se siguió la metodología propuesta en [45]. El análisis fue desarrollado ignorando los cambios en la energía cinética y potencial. El diagrama de la planta se muestra en la figura 16 y en el anexo 1. El balance de energía para la condición de estado estable, está determinado por la (Ec. 19).

$$\sum \dot{Q}_k + \dot{m} \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i \right) = \dot{m} \left(h_o + \frac{V_o^2}{2} + gZ_o \right) + \sum \dot{W} \quad (\text{Ec. 19})$$

donde:

\dot{Q}_k : calor transferido al sistema desde una fuente a T_k

\dot{W} : potencia neta desarrollada por el sistema

V : velocidad del fluido

Z : altura respecto al nivel del mar

h : entalpia específica

La eficiencia de primera ley del sistema está definida por la (Ec. 20).

$$\eta_I = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\eta_b \cdot \dot{Q}_{RSU}} \quad (\text{Ec. 20})$$

El calor proveniente de los RSU \dot{Q}_{RSU} , se calcula mediante la (Ec. 21), siendo la variable \dot{m}_{RSU} y el PCI_{RSU} , el flujo másico y el poder calorífico de los RSU.

$$\dot{Q}_{RSU} = \dot{m}_{RSU} \cdot PCI_{RSU} \quad (\text{Ec. 21})$$

El calor recuperado de los RSU al fluido de trabajo \dot{Q}_{in} , se estima según la (Ec. 22), siendo η_b la eficiencia del generador de vapor (*boiler*).

$$\dot{Q}_{in} = \eta_b \cdot (\dot{m}_{RSU} \cdot PCI_{prom}) \quad (\text{Ec. 22})$$

El calor cedido al fluido de trabajo en el generador de vapor está dado por la (Ec. 23).

$$\dot{Q}_{cal} = \dot{m}_8 \cdot (h_{10} - h_8) - \text{pérdidas} \quad (\text{Ec. 23})$$

La potencia generada por la turbina \dot{W}_t , se calcula mediante la (Ec. 24), siendo x y y las fracciones másicas de las extracciones de la turbina.

$$\dot{W}_t = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - x \cdot h_{14} - y \cdot h_2) \quad (\text{Ec. 24})$$

Aplicando primera ley de la termodinámica al sistema de bombeo de primera etapa, se obtiene la potencia ideal \dot{W}_{sb1} de consumo (Ec. 25).

$$\dot{W}_{sb1} = \dot{m}_4 \cdot v_5 \cdot (P_5 - P_4) \quad (\text{Ec. 25})$$

La potencia real del sistema de bombeo \dot{W}_{rb1} , se obtiene de la (Ec. 26), donde η_p es la eficiencia en el sistema de bombeo.

$$\dot{W}_{rb1} = \frac{\dot{W}_{sb1}}{\eta_p} \quad (\text{Ec. 26})$$

Así mismo, aplicando primera ley de la termodinámica al sistema de bombeo de segunda etapa, se obtiene la potencia ideal de consumo \dot{W}_{sb2} , según la (Ec. 27).

$$\dot{W}_{sb2} = \dot{m}_7 \cdot v_8 \cdot (P_8 - P_7) \quad (\text{Ec. 27})$$

La potencia de consumo real del sistema de bombeo se obtiene como se indica en la (Ec. 28).

$$\dot{W}_{rb2} = \frac{\dot{W}_{sb2}}{\eta_p} \quad (\text{Ec. 28})$$

La potencia neta del ciclo \dot{W}_{net} , se determina a partir de la (Ec. 29).

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_t - (\dot{W}_{rb1} + \dot{W}_{rb2}) \quad (\text{Ec. 29})$$

El calor rechazado en el condensador es calculado a partir de la (Ec. 30).

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_3 \cdot (h_3 - h_4) \quad (\text{Ec. 30})$$

Realizando el balance de energía en el eyector, se obtiene la (Ec. 31).

$$\dot{m}_6 \cdot h_6 = \dot{m}_{12} \cdot h_{12} + \dot{m}_5 \cdot h_5 \quad (\text{Ec. 31})$$

El balance de masa para el colector de vapor, está definido según la (Ec. 32).

$$\dot{m}_{10} \cdot h_{10} = \dot{m}_{11} \cdot h_{11} + \dot{m}_1 \cdot h_1 \quad (\text{Ec. 32})$$

De los balances de masa se obtiene que:

$$\dot{m}_1 = 0,90907 \dot{m}_{tot} ;$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = y \dot{m}_1 ;$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_5 + \dot{m}_{12} ;$$

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} = x \dot{m}_1$$

En relación con los resultados presentados en la Tabla 9, se puede considerar que los parámetros seleccionados para representar el caso de estudio y la disposición de los elementos que componen la planta fueron apropiados y corresponden con una buena aproximación de la planta *WtE* real. La eficiencia obtenida fue del 17% la cual es igual a la del funcionamiento actual de la planta y es similar a los estudios encontrados en la literatura. [19]

El grado de humedad de los residuos es un factor que influye en el proceso de incineración y esto es evidente al estimar el poder calorífico ya que los RSU de la isla de San Andrés contienen bajo contenido en residuos orgánicos en comparación con la media del país. Se concluye que la planta fue diseñada pensando en dos modos de operación como se muestra en la Figura 16. El primero de ellos corresponde al ciclo de potencia presentado mientras que el segundo, implica la incineración de residuos sin recuperación energética, con el fin de disminuir el volumen de RSU dispuestos en la isla.

Tabla 9. Resultados del modelo de energía de la planta *WtE* San Andrés Colombia.

Tipo de residuo	Residuos sólidos urbanos
Número de líneas	2
Consumo total de RSU	80 [ton/día]
PCI promedio RSU	13946 [kJ/kg]
Flujo de calor de entrada	8254 [kW]
Temperatura de aire entrada incinerador	300 [K]
Temperatura de gases salida incinerador	1123,15 [K]
Temperatura de gases a la salida postcombustión	1523,15 [K]
Flujo másico de vapor saturado	3,889 [kg/s]
Presión en el condensador	10 [kPa]
Presión de vapor primera etapa	130 [kPa]
Aumento de presión eyector	65 [kPa]
Presión en el deaireador	195 [kPa]
Presión de bombeo segunda etapa	1135 [kPa]
Temperatura del agua a la salida del generador de vapor	458,65 [K]
Temperatura del agua a la salida de la turbina	318,97 [K]
Calidad del agua a la salida de la turbina	90%
Potencia neta del ciclo	1403 [kW]
Potencia máxima de la turbina	1600 [kW]
Eficiencia del ciclo	17%

3.3 EVALUACIÓN ESCENARIO TÉCNICO 2

En este escenario se propone una configuración de una planta térmica tipo Rankine adaptada según las características del relleno Doña Juana de la ciudad de Bogotá, como se muestra en la Figura 22. Para realizar el análisis de primera ley de la termodinámica se siguió la metodología propuesta en [45] y que fue implementada en el análisis de la planta *WtE* de San Andrés. La evaluación de este escenario se realiza en dos etapas. La primer etapa consiste en determinar el poder calorífico de los RSU para cuatro casos de estudio denominados A, B,C y D. La segunda etapa, consiste en desarrollar el modelo termodinámico de primera ley para la planta propuesta. El anexo 3 muestra la descripción completa de la planta propuesta.

3.3.1 Cálculo del poder calorífico de los RSU en *cofiring*

La Figura 17 muestra el proceso de combustión *cofiring* que se modeló para la ciudad de Bogotá. La reacción de combustión estequiométrica se puede modelar según la (Ec. 33). Las especies involucradas en la ecuación, son obtenidas de la caracterización elemental de los RSU mostrada en la Tabla 10. Se plantea que la fracción x_b corresponde al 20% de biogás como combustible en la mezcla en *cofiring*, donde a_1 , b_1 , c_1 y d_1 , son las constantes del balance estequiométrico.

$$(1 - x_b) \cdot (C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\delta)_{RSU} + x_b (C_\alpha H_\beta O_\gamma N_\delta)_{Biogás} + a_1 (0,21 O_2 + 0,79 N_2) \quad (Ec. 33) \\ \rightarrow b_1 CO_2 + c_1 H_2O + d_1 N_2$$

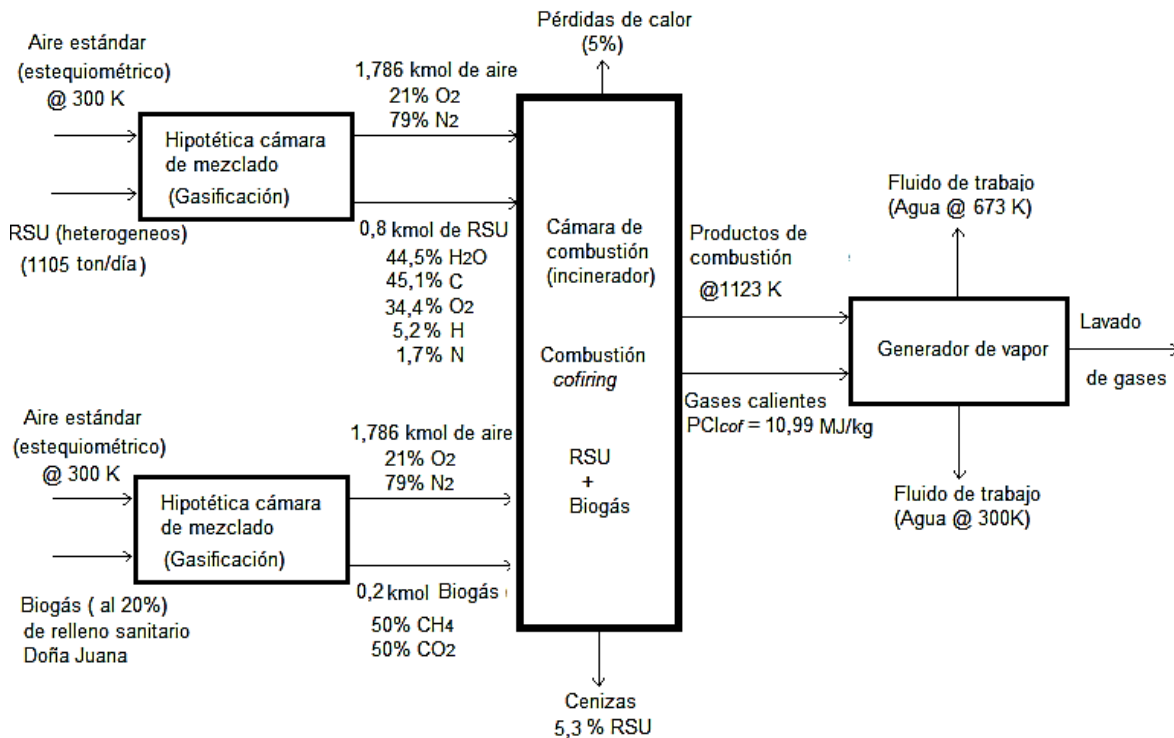


Figura 17. Proceso de combustión *cofiring* planta *WtE* Bogotá.

Tabla 10. Caracterización de los RSU de Colombia, adaptado de [41].

Tipo	% RSU	% H2O	% C	% H	% O	% N	% S	% Ash
Alimentos	56,0	70,0	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel	22,0	6,0	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Plástico	5,0	2,0	60,0	7,2	22,8	0,0	0,0	10,0
Textiles	4,0	10,0	55,0	6,6	31,2	4,6	0,2	2,5
Maderas	5,0	20,0	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
Podas	5,0	60,0	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 10, se realiza el cálculo promedio de las especies a simular en la reacción de combustión, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Caracterización elemental de los RSU del relleno Doña Juana, adaptado de [32].

Tipo	%H ₂ O	% C	%H	%O	%N	%S	%ash
Alimentos	42,4	29,1	3,90	22,8	1,60	0,240	3,03
Papel	1,12	8,10	1,10	8,20	0,06	0,040	1,12
Plástico	0,21	6,20	0,70	2,30	0,00	0,000	1,03
Textiles	0,19	1,10	0,12	0,60	0,09	0,004	0,05
Maderas	0,06	0,16	0,02	0,14	0,00	0,001	0,01
Podas	0,52	0,42	0,05	0,33	0,03	0,002	0,04
Promedio	44,5	45,1	5,2	34,4	1,7	0,3	5,3

A partir de la Tabla 10 y la Tabla 11, se calcula el PCI según las correlaciones mostradas desde la (Ec. 3) a la (Ec. 6). Se presentan 4 casos de aprovechamiento energético (A, B, C, D) para la técnica de incineración como alternativas del escenario técnico 2.

CASO A. CÁLCULO DEL PCI DE LOS RSU DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA

Este caso presenta la estimación del poder calorífico de los RSU del relleno sanitario Doña Juana de la ciudad de Bogotá. El PCI calculado corresponde a residuos sólidos depositados directamente en el relleno sanitario los cuales no han sido separados ni secados previamente como se presenta en la Figura 18. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados poder calorífico RSU para las condiciones del Caso A.

Correlación	PCS $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	PCI $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
Lloyd y Davenport	11144	9842
Laura Meratz	10605	9302
Boie	10579	9277
Wilson	10051	8749
Promedio	10595	9292

Según se muestra en la Tabla 11, la fracción orgánica de los RSU es acorde con el promedio nacional, lo que contribuye a un contenido alto de humedad en los residuos; esto hace que el PCI estimado sea un poco bajo en comparación con el PCI estimado para la isla de San Andrés.

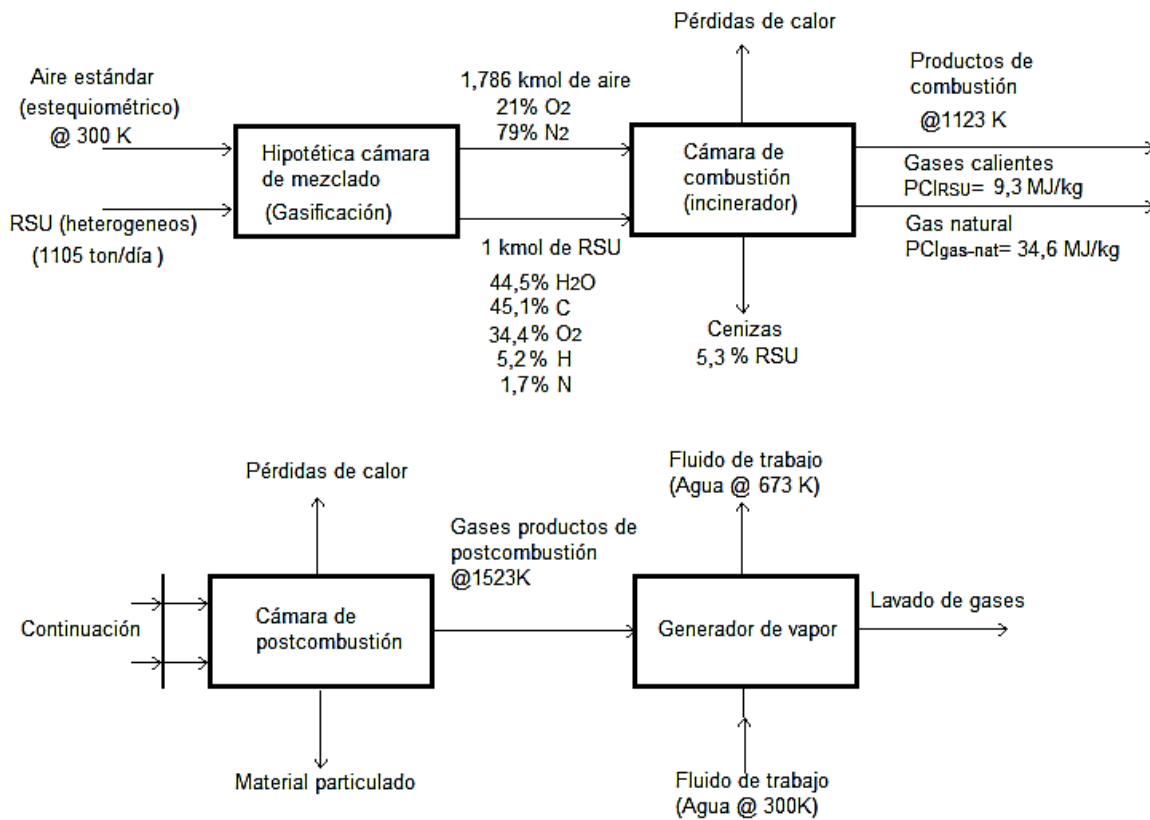


Figura 18. Proceso de combustión RSU planta WtE Bogotá según las condiciones del caso A.

CASO B. CÁLCULO DEL PCI DE LOS RSU EN COFIRING CON BIOGÁS

En este caso se estima el poder calorífico de la combustión en *cofiring* entre los RSU con el biogás captado del relleno sanitario cuya composición promedio es 50% metano y 50% dióxido de carbono.

La relación de combustión *cofiring* para ambos combustibles es 80% RSU y 20% biogás, como se muestra en la Figura 19. Los resultados del cálculo del poder calorífico se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Resultados poder calorífico RSU para las condiciones del Caso B.

Correlación	PCS $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	PCI $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
Lloyd y Davenport	13108	11547
Laura Meratz	12487	10926
Boie	12496	10935
Wilson	12146	10585
Promedio	12559	10998

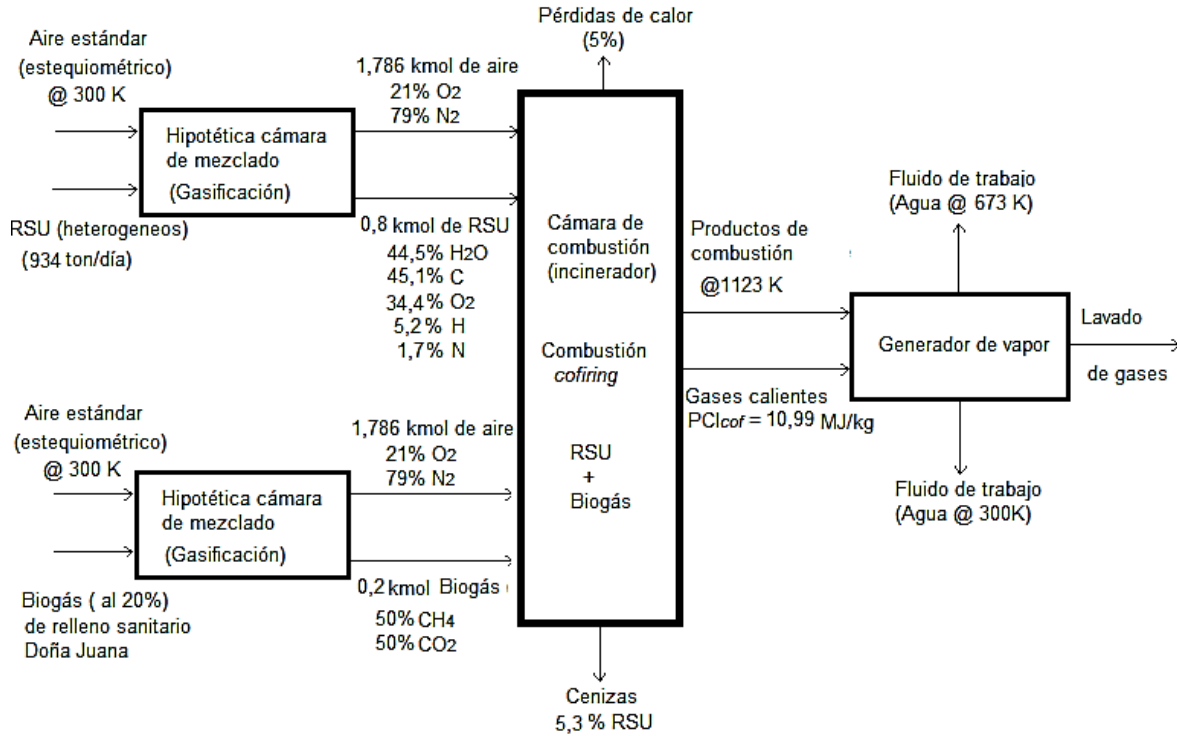


Figura 19. Proceso de combustión *cofiring* planta WtE Bogotá según las condiciones del caso B.

CASO C. CÁLCULO DEL PCI DE LOS RSU EN COFIRING CON BIOGÁS REFINADO

Para este análisis se propone refinar el biogás captado del relleno sanitario Doña Juana mediante el sistema de compresión, de tal forma que la cantidad de dióxido de carbono presente disminuya y aumente el porcentaje de metano. Los resultados simulados tienen una composición de biogás con 90%CH₄ y 10% CO₂. [46]

El proceso de combustión *cofiring* simulado asume una relación de 80% RSU y 20% biogás refinado, como se presenta en la Figura 20. Los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados poder calorífico RSU para las condiciones del Caso C.

Correlación	PCS $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	PCI $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$
Lloyd y Davenport	16550	14522
Laura Meratz	16114	14086
Boie	16032	14004
Wilson	16323	14295
Promedio	16255	14227

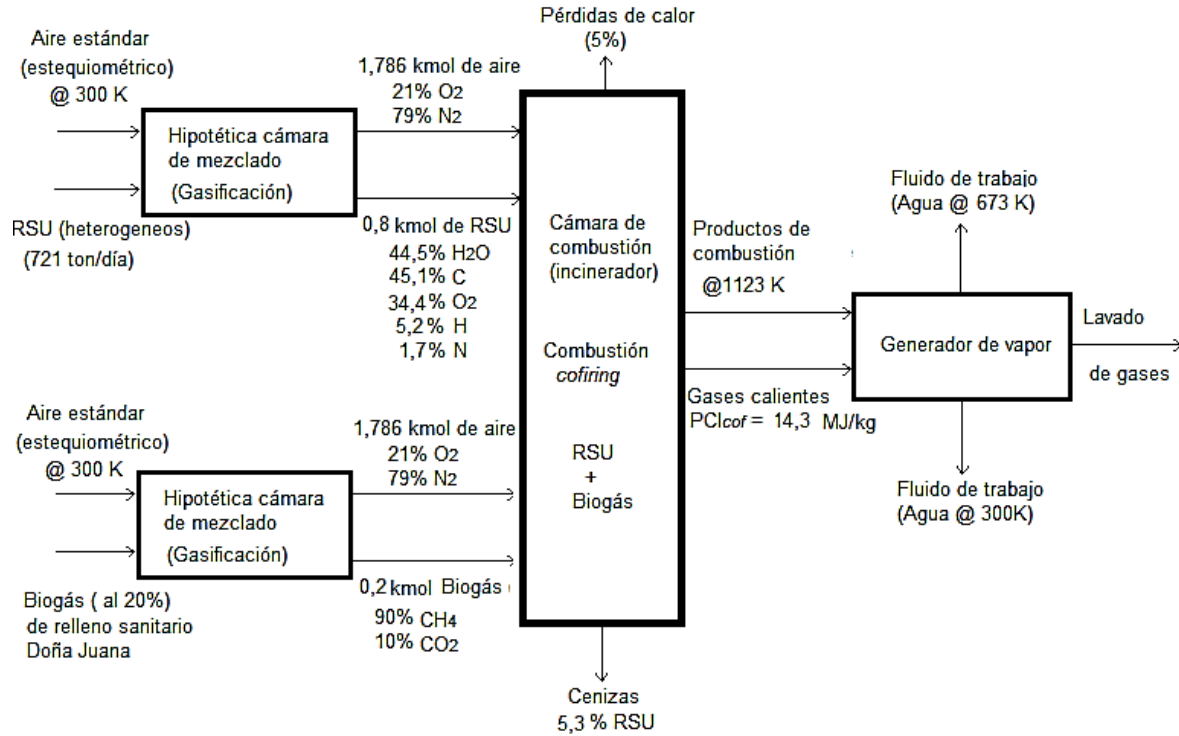


Figura 20. Proceso de combustión *cofiring* planta WtE Bogotá según las condiciones del caso C.

CASO D. CÁLCULO DEL PCI DE LA FRACCIÓN INORGÁNICA DE LOS RSU EN COFIRING CON BIOGÁS REFINADO

Este caso considera la combustión *cofiring* de la fracción inorgánica de los RSU del relleno Doña Juana (exceptuando los residuos inertes como vidrios, minerales, metales y otros) y el biogás refinado mediante la técnica de compresión [46]. La caracterización elemental de los residuos inorgánicos separados se muestra en la Tabla 15. La combustión *cofiring* se realizó mezclando 80% RSU inorgánicos con 20% biogás refinado como se muestra en la Figura 21.

Tabla 15. Resultados poder calorífico RSU para las condiciones del Caso D.

Tipo de residuo	%RSU inorgánico	% Composición elemental	
Papel	58,3	C	48,9
Plástico	32,1	H	6,33
Textiles	6	O	35,7
Maderas	1	N	0,49
Podas	1	S	0,13
Cenizas	1,6	Ash	3,0
Total	100	Humedad	5,5

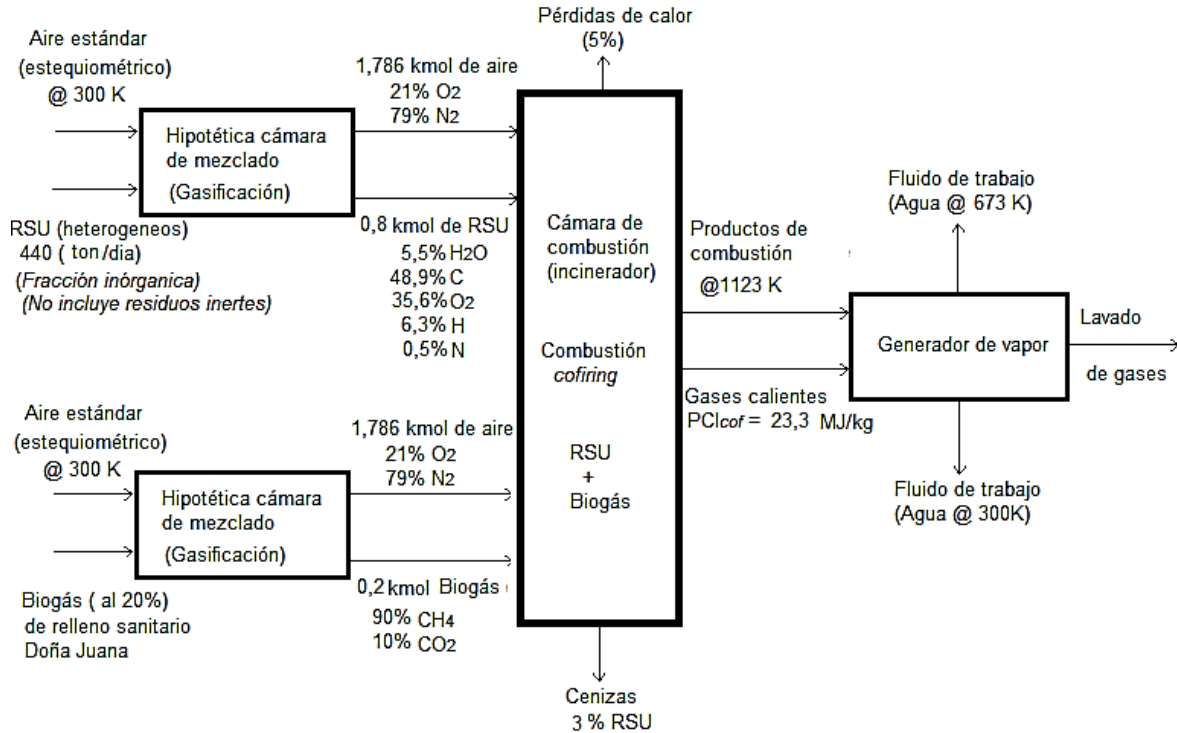


Figura 21. Proceso de combustión *cofiring* planta WtE Bogotá según las condiciones del caso D.

A partir de las condiciones presentadas en la Figura 21, el poder calorífico es estimado según las correlaciones de Lloyd y Davenport ((Ec. 3), Laura Meraz ((Ec. 4), Boie (Ec. 5) y Wilson (Ec. 6). Los resultados se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados poder calorífico RSU relleno sanitario Doña Juana, RSU para las condiciones presentadas en el Caso D.

Correlación	PCS $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	PCI $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
Lloyd y Davenport	25888	23796
Laura Meratz	24906	22815
Boie	25076	22984
Wilson	25595	23503
Promedio	25366	23275

Como se observa en la Tabla 16, el tratamiento in situ y separación de la fracción de residuos orgánicos e inertes de la fracción inorgánica, conlleva a un aumento significativo en el poder calorífico. Esto se debe principalmente a la disminución de la humedad contenida en los residuos y el alto contenido de residuos de tipo plástico y papel. Finalmente los resultados termodinámicos de la planta se presentan en la Tabla 18.

3.3.2 Análisis de energía planta WtE Bogotá

El análisis fue desarrollado ignorando los cambios en la energía cinética y potencial. El diagrama de la planta se muestra en la Figura 22. El balance de energía para la condición de estado estable, está determinado por la (Ec. 19).

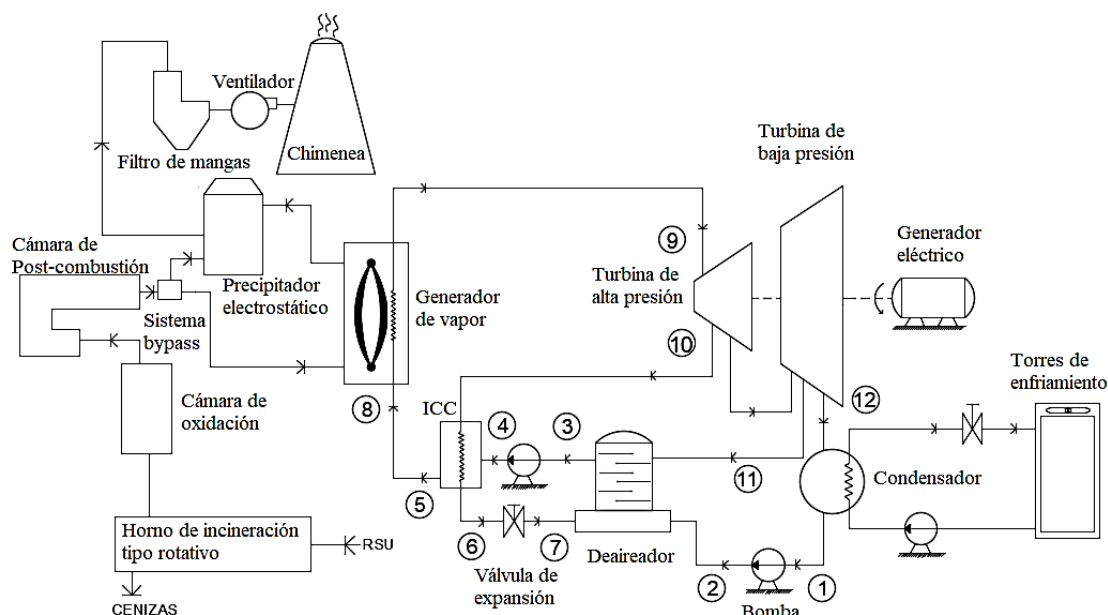


Figura 22. Planta WtE propuesta para el relleno sanitario Doña Juana. (Autoría propia)

Las condiciones de operación de la planta WtE propuesta para la ciudad de Bogotá se presentan en la Tabla 17. El modelo teórico simulado fue realizado en el EES y se muestra en el anexo 4.

Tabla 17. Condiciones de operación planta WtE San Andrés.

Estado	Observaciones	P [kPa]	T [°C]	h $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	s $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	v $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right]$
1	Entrada sistema de bombeo de primera etapa	10	45	188,4	0,654	0,00101
2	Salida sistema de bombeo de primera etapa	300	47,3	198,1	0,668	0,00101
3	Salida del deaerador	300	133,6	561,6	1,672	0,00107
4	Salida sistema de bombeo de segunda etapa	2000	150,3	634,6	1,844	0,00109

Tabla 17. Condiciones de operación planta WtE San Andrés, continuación.

Estado	Observaciones	P [kPa]	T [°C]	h $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right]$	s $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	v $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right]$
5	Salida intercambiador de calor cerrado- ICC	2000	170,4	721,9	2,045	0,00111
6	Entrada válvula de expansión	800	170,4	721,2	2,046	0,00111
7	Salida válvula de expansión	300	133,6	721,2	2,065	0,04569
8	Entrada generador de vapor	2000	170,4	721,9	2,045	0,00111
9	Entrada turbina de alta presión	2000	400	3248	7,127	0,1512
10	Primera extracción turbina- ICC	800	272,3	2997	7,127	0,3071
11	Segunda extracción turbina- deaireador	300	159,9	2782	7,127	0,6505
12	Salida turbina	10	45,8	2258	7,127	12,68
13	Estado de referencia, condiciones ambientales	101,3	25	104,8	0,367	0,00100

La eficiencia de primera ley del sistema está definida por la (Ec. 34), donde η_b es la eficiencia del sistema de generación de vapor (*boiler*).

$$\eta_l = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{W}_{net}}{\eta_b \cdot \dot{Q}_{cof}} \quad (\text{Ec. 34})$$

El calor proveniente del *cofiring* \dot{Q}_{cof} , se calcula mediante la (Ec. 35), donde el parámetro \dot{m}_{cof} representa el flujo másico de la mezcla *cofiring* RSU y biogás y el PCI_{cof} es el poder calorífico.

$$\dot{Q}_{cof} = \dot{m}_{cof} \cdot PCI_{cof} \quad (\text{Ec. 35})$$

El calor recuperado al fluido de trabajo \dot{Q}_{in} , se estima según la (Ec. 36)

$$\dot{Q}_{in} = \eta_b \cdot (\dot{m}_{cof} \cdot PCI_{cof}) \quad (\text{Ec. 36})$$

El calor cedido al fluido de trabajo, en el generador de vapor está dado por la (Ec. 37).

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_{tot} \cdot (h_9 - h_5) \quad (\text{Ec. 37})$$

La potencia ideal generada por la turbina \dot{W}_{st} , se calcula mediante la (Ec. 38), siendo y y z las fracciones másicas de las extracciones de la turbina.

$$\dot{W}_{st} = \dot{m}_{tot}(h_9 - y \cdot h_{10s} - z \cdot h_{11s} - (1 - y - z) \cdot h_{12s}) \quad (\text{Ec. 38})$$

La potencia real generada por la turbina se calcula mediante la (Ec. 39).

$$\dot{W}_t = \dot{W}_{st} \cdot \eta_t \quad (\text{Ec. 39})$$

Aplicando primera ley de la termodinámica al sistema de bombeo de primera etapa \dot{W}_{sb1} , se obtiene la potencia ideal de consumo de las bombas mediante la (Ec. 40).

$$\dot{W}_{sb1} = (1 - y - z) \cdot \dot{m}_{tot} \cdot v_1 \cdot (P_2 - P_1) \quad (\text{Ec. 40})$$

La potencia de consumo real del sistema de bombeo \dot{W}_{rb1} , se obtiene de la (Ec. 41).

$$\dot{W}_{rb1} = \frac{\dot{W}_{sb1}}{\eta_{b1}} \quad (\text{Ec. 41})$$

Así mismo, aplicando primera ley de la termodinámica al sistema de bombeo de segunda etapa \dot{W}_{sb2} , se obtiene la potencia ideal de consumo según la (Ec. 42), siendo \dot{m}_{tot} el flujo másico total del fluido de trabajo (vapor) del ciclo.

$$\dot{W}_{sb2} = \dot{m}_{tot} \cdot v_3 \cdot (P_4 - P_3) \quad (\text{Ec. 42})$$

La potencia de consumo real del sistema de bombeo \dot{W}_{rb2} , se obtiene de la (Ec. 43).

$$\dot{W}_{rb2} = \frac{\dot{W}_{sb2}}{\eta_{b2}} \quad (\text{Ec. 43})$$

La potencia neta del ciclo se determina a partir de la (Ec. 44).

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_t - (\dot{W}_{rb1} + \dot{W}_{rb2}) \quad (\text{Ec. 44})$$

El calor rechazado en el condensador es calculado a partir de la (Ec. 45).

$$\dot{Q}_{out} = (1 - y - z) \cdot \dot{m}_{tot} \cdot (h_{12} - h_1) \quad (\text{Ec. 45})$$

Realizando el balance de energía en el eyector, se obtiene la (Ec. 46).

$$y = \frac{h_5 - h_4}{h_{10s} - h_6} \quad (\text{Ec. 46})$$

El balance de masa para el colector de vapor, está definido según la (Ec. 47).

$$z = \frac{(h_3 - h_2) - y \cdot (h_7 - h_2)}{h_{11s} - h_2} \quad (\text{Ec. 47})$$

Tabla 18. Resultados planta *WtE cofiring* Bogotá Colombia.

Tipo de combustible	Residuos sólidos urbanos + biogás
Número de líneas	1
Consumo total de RSU	1105 [ton/día] (caso A)
	440 [ton/día] (caso D)
PCI promedio RSU	9,3 [MJ/kg] (caso A)
	23,3 [MJ/kg] (caso D)
Flujo de calor de entrada	101 [MW]
Temperatura de aire entrada incinerador	300 [K]
Temperatura de gases salida incinerador	1123,15 [K]
Temperatura de gases a la salida postcombustión	1523,15 [K]
VAPOR	
Flujo másico de vapor saturado	40 [kg/s]
Presión en el condensador	10 [kPa]
Presión de vapor primera etapa	300 [kPa]
Presión en el deaireador	300 [kPa]
Presión de bombeo segunda etapa	2000 [kPa]
Temperatura del agua a la salida del generador de vapor	673,15 [K]
Temperatura del agua de la primera extracción turbina	545,45 [K]
Temperatura del agua de la segunda extracción turbina	433,05 [K]
Temperatura del agua a la salida de la turbina	318,97 [K]
Calidad a la salida de la turbina	86,38 %
Potencia neta del ciclo	31,6 [MW]
Potencia máxima de la turbina	35,6 [MW]
Eficiencia del ciclo	31,33 %

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentó la configuración general de la planta *WtE* de San Andrés propuesta en el escenario técnico 1 y cuatro casos de estudio para el escenario técnico 2. El modelo termodinámico se reconstruyó a partir de la información obtenida mediante visita técnica a la planta. A partir del análisis de funcionamiento realizado, se procedió a realizar una configuración de planta *WtE* para la ciudad de Bogotá, considerándose varios casos para el aprovechamiento de los RSU los cuales fueron propuestos a partir de la experiencia adquirida durante el desarrollo de este proyecto de grado y las revisiones del estado del arte de las técnicas aquí propuestas.

La Tabla 19 muestra los resultados de cada escenario y el promedio del poder calorífico calculado para cada caso de estudio. Los resultados aquí presentados están entre $9,3 \sim 13,9 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$ y son acordes con los obtenidos en la literatura, donde los resultados obtenidos teóricamente oscilan entre $9,9 \sim 11 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$ y el resultado experimental $10,1 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$. [41]

Tabla 19. Comparación de los resultados obtenidos para los escenarios técnicos 1 y 2. [41]

Escenario	Técnica Aplicada	Combustible	Resultado PCI $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$	Resultado PCS $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$	% Incremento
1.San Andrés	Incineración	RSU	13,9	15,2	-
2.Bogotá					
Caso A	Incineración	RSU	9,3	10,6	0
Caso B	<i>Cofiring</i>	RSU + biogás	11	12,6	15,5
Caso C	<i>Cofiring</i>	RSU + biogás refinado	14,2	16,2	34,7
Caso D	<i>Cofiring</i>	Fracción inorgánica RSU + biogás refinado	23,3	25,4	60

Según los resultados presentados en la Tabla 19, se puede concluir que para el escenario técnico 1 (San Andrés) el poder calorífico está por encima del promedio nacional. Esto se debe al bajo contenido de residuos orgánicos (fermentables) provenientes de los alimentos principalmente. Los resultados del escenario técnico 2 (Bogotá) muestran que realizar actividades previas a la incineración como lo es la separación de la fracción orgánica de los RSU puede aumentar considerablemente el poder calorífico. Así mismo, los resultados obtenidos para la técnica *cofiring* son satisfactorios y se concluye que emplear la técnica aumenta drásticamente el aprovechamiento energético a partir de los residuos finalmente dispuestos en los rellenos sanitarios. Esto implica que con menor cantidad de RSU se puede generar mayor energía.

Con base en la comparación realizada, se concluye que existen principalmente dos formas de operación de las plantas *WtE*. La primera de ellas, implica incinerar los recursos sin importar mucho la recuperación energética, sino enfocándose en la reducción del volumen de los residuos para finalmente disponerlos como cenizas. El segundo modo de operación implica que existe un potencial de aprovechamiento a partir de la incineración, el cual puede ser aumentado con la fusión de la técnica *cofiring* hasta en un 60% con base en un modo de funcionamiento de referencia. El calor generado puede ser utilizado para generar potencia eléctrica o también en aplicaciones de cogeneración. El ahorro de combustible-RSU por el aumento del poder calorífico mediante el uso del biogás en *cofiring* se presenta en la Tabla 20.

Tabla 20. Ahorro de combustible mediante la implementación de la técnica *cofiring*.

Escenario 2	PCI $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right]$	$\dot{m}_{cof} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$	Ahorro $\left[\frac{\text{ton}}{\text{dia}}\right]$
Caso A	9,3	12,8	0
Caso B	11	10,8	171
Caso C	14,2	8,4	384
Caso D	23,3	5,1	664

La técnica de *cofiring* se hace evidentemente viable en el escenario técnico 2- caso D, en el que se combina la incineración de residuos con el biogás captado del relleno sanitario. En este proyecto de grado se propuso utilizar el biogás proveniente del relleno sanitario con el fin de mitigar el impacto ambiental por la liberación directa a la atmosfera de este gas de efecto invernadero.

El biogás generado es una fuente de energía no convencional y no tiene ningún costo en comparación con el uso del carbón pulverizado o gas natural. Esto hace que la inversión para lograr su aprovechamiento sea inicialmente en el desarrollo del proyecto y el montaje de la red de captación, como se presenta en el siguiente capítulo.

También se concluye que una alternativa técnicamente viable, es reemplazar los quemadores de postcombustión de la planta *WtE* de San Andrés con el fin de utilizar el biogás del relleno *Magic Garden* en sustitución del gas natural que debe comprar el operador de la planta. Este planteamiento no es abordado en este proyecto de grado, pero se propone para futuras investigaciones profundizar en el fenómeno de transferencia de calor que sucede en el incinerador y analizar el comportamiento de la mezcla en la zona de postcombustión, como se propone en [47] y [48].

Considerando la proporción de residuos orgánicos provenientes de los alimentos, se concluye que una alternativa al aprovechamiento consiste en implementar biodigestores a gran escala para disponer finalmente estos residuos y aprovechar energéticamente el biogás generado. Esto implica que los residuos deben ser separados previamente, utilizando la fracción de residuos inertes como vidrio y metales para posteriormente ser reciclados y reutilizados. La fracción de residuos restantes consistirá en papeles, cartones y plásticos, los cuales poseen un alto PCI y pasarían directamente a ser incinerados. El biogás como se mencionó anteriormente, podría ser implementado en *cofiring* y en la fase de post-combustión.

En la Tabla 21 se muestran los consumos de energía de las bombas, la potencia generada en el eje de la turbina y la potencia neta, para los diferentes escenarios planteados. También, se muestra la eficiencia energética del proceso de conversión de energía.

Tabla 21. Evaluación de los escenarios.

Descripción		Escenario 1	Escenario 2
Potencia de la turbina	[kW]	1408	31739
Potencia bomba 1	[kW]	0,43	10,91
Potencia bomba 2	[kW]	4,5	82
Potencia neta	[kW]	1403	31646
Calor total de entrada	[kW]	8254	101025
Eficiencia de la planta	[%]	17	31

De la Tabla 21 se concluye que las condiciones del escenario 1 corresponden a un prototipo de planta *WtE* que fue diseñado y construido con el objetivo de incinerar los RSU provenientes de la isla, y así mitigar el daño ambiental que está ocasionando el relleno sanitario. Por otro lado, de las condiciones presentadas en el escenario 2, se concluye que el modelo diseñado corresponde a una planta de aprovechamiento para una ciudad de 10 millones de habitantes. Si bien la eficiencia obtenida para el escenario 2 es alta por ser una planta alimentada con residuos, su funcionamiento corresponde a una técnica avanzada y es acorde con los resultados publicados en [43], en los que el promedio es 55 [MW] térmicos y 15,6 [MW] eléctricos con una eficiencia del ciclo cercana al 28%, lo que implica que la configuración presentada es por lo menos teóricamente viable y su funcionamiento es mejor que el promedio.

La disposición del ciclo de vapor tiene un impacto relevante, como recomendación se pueden proponer nuevas configuraciones de los elementos que puedan aumentar la eficiencia eléctrica de la planta. Realizar un análisis exergético serviría para identificar los lugares y las magnitudes de las irreversibilidades y así realizar posibles mejoras al sistema de conversión de energía.

4. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO

En este capítulo se presentan los resultados del escenario técnico 3 el cual consiste en el análisis de la técnica de captación de biogás para el relleno sanitario La Glorita en la ciudad de Pereira. Se exponen los modelos teóricos para simular la generación de biogás en rellenos sanitarios, las variables asociadas al fenómeno de generación de biogás, la evaluación de tres diferentes modelos y finalmente se presenta la valorización energética mediante aplicaciones de motogeneradores.

4.1 MODELOS DE ESTIMACIÓN DE BIOGÁS GENERADO EN EL RELLENO

En general, existen dos métodos para estimar la cantidad de biogás generado en rellenos. El primero de ellos, es mediante el uso de modelos teóricos que representan matemáticamente los fenómenos químicos, físicos o biológicos que se llevan a cabo en la degradación del material orgánico para generar biogás. El segundo de ellos, es mediante la medición directa en rellenos que dispongan de una red de captación de biogás, ya sea para ser directamente emitido a la atmósfera, para la quema en antorchas, o para el aprovechamiento energético mediante aplicaciones en motogeneradores, producción de frío o calor, cogeneración, entre otras. [49] [50] [51]

Los modelos teóricos son seleccionados a partir de la precisión de los resultados; la disponibilidad de datos y variables asociadas al proceso. Existen modelos teóricos de primer y segundo orden. En la práctica los modelos de generación de primer orden son los más utilizados. [49]

4.1.1 Modelos teóricos

Entre estos modelos destacan el modelo del *Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*, el modelo *Landfill Gas Emission Model- LandGEM*, y el modelo Colombiano aprobado por *United States Environmental Protection Agency LandGEM US-EPA* [52]. En la Tabla 22 se exponen los principales modelos predictivos para estimar la cantidad de metano generado en un relleno sanitario. Algunos modelos como el *GasSim* utilizan aproximaciones estadísticas y el método de Montecarlo para estimar la producción de metano. Otros modelos reportados en la literatura son: el método de Tier 3, método de cámara de flujo cerrado, modelo de primer orden (TNO), modelo multifase, *EPER* modelo Francés y modelo Alemán [14].

La estimación de las emisiones de biogás de los rellenos sanitarios resulta compleja, debido a que se trata de múltiples fuentes con una alta variabilidad espacial y temporal. Las principales variables asociadas a todos los modelos son la composición de los RSU y el nivel de lluvia en la región. Los modelos seleccionados para realizar el estudio del biogás en La Glorita son el modelo *LandGem* debido a que es ampliamente utilizado; el modelo *GasSim* el cual se encuentra programado en un software de versión gratuita, ambos modelos son recomendados en [53]; y el modelo Colombiano debido a que está específicamente desarrollado para el caso de estudio en la región.

Tabla 22. Modelos de generación de biogás en rellenos sanitarios.

Metodología	Tasa de generación
<i>TIER 3</i>	$q_{LFG} = \frac{Q_e}{\pi r_e^2}$
<i>IPCC</i>	$CH_4 \cdot emisiones \left(\frac{Gg}{año} \right)$ $= (MSW_T \times MSW_F \times MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times \frac{16}{12} - R) \times (1 - 0X)$
<i>EMCOM</i>	$Q = L_0 R (e^{-kc} - e^{-kt})$
Método de cámara de flujo cerrado	$J = \left(\frac{V}{A} \right) \frac{dC}{dt}$
<i>EPA</i>	$LFG = 2L_0 R (e^{-kc} - e^{-kt})$
Combinación <i>IPCC-US EPA</i>	$q = L_0 k e^{-kt}$
<i>US EPA EPLUS</i>	$Q_{T,X} = k R_x L_0 e^{-k(T-X)}$
Modelo Mexicano de biogás	$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F)$
Modelo de primer orden (<i>TNO</i>)	$\alpha_t = 1.87 \xi A C_0 k e^{-kt}$
Modelo multifase	$\alpha_t = \xi \sum_{t=1}^n c A C_0 k e^{-kt}$
<i>LANDGEM US EPA</i>	$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$
<i>GasSim</i>	Es un software que utiliza dos enfoques para realizar las simulaciones. Ambos basados en el método de Montecarlo y aproximaciones estadísticas.
Modelo francés <i>EPER</i>	$FE_{CH_4} = \sum_{x=1}^n FE_0 \cdot \left(\sum_{1,2,3..} A_i p_i k_i e^{-k_i t} \right)$
Modelo alemán <i>EPER</i>	$M_e = M \cdot BDC \cdot BDC_f \cdot F \cdot D \cdot C$
Modelo <i>Scholl Canyon</i>	$\frac{dG}{dt} = -\frac{dL}{dt} = k \cdot L = k \cdot L_0 \cdot e^{-kt}$

La capacidad máxima de emisión de metano se alcanza cuando el relleno sanitario aún no ha sido clausurado, esto se debe a que la degradación de la materia orgánica (residuos de degradación rápida) ocurre en su mayoría en los primeros años. No obstante, después de clausurado el relleno sanitario continua con las emisiones de biogás, ya que residuos como el papel y el cartón son de degradación lenta y algunos pueden tardar en degradarse hasta 30 años, esto si las condiciones pluviales en el relleno son bajas y la región sea predominantemente seca. Por tal razón, la proyección del biogás se estimó en un horizonte de sucesos de 100 años, que comprenden hasta el año 2100. [54]

A continuación se presentaran los modelos de generación de biogás que se utilizarán para estimar la cantidad de biogás generado del relleno sanitario La Glorita. El modelo *LANDGEM* se seleccionó debido a que es el más utilizado a nivel mundial. El modelo Colombiano se seleccionó debido a que está reconocido por la *US-EPA* y está basado en el modelo mexicano de biogás, modificado para tener en cuenta las características climatológicas y la caracterización de los RSU en Colombia. Finalmente se seleccionó el modelo *GASSIM* debido a que es un software ampliamente utilizado en la comunidad europea.

LANDFILL GAS EMISSION MODEL (LANDGEM)

El modelo *LandGEM* es utilizado para estimar la cantidad de biogás generado en los rellenos sanitarios. Este modelo se basa en una ecuación de descomposición cinética de primer orden para cuantificar las emisiones derivadas de la descomposición de los residuos orgánicos presentes en los RSU. El modelo *LandGEM* se presenta en la (Ec. 48).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-k t_{ij}} \quad (\text{Ec. 48})$$

donde:

Σ : suma desde el año de apertura +1 ($i=1$) hasta el año de proyección (n);

$i = 1$: tiempo de incremento de cada año;

$j = 0,1$: tiempo de incremento para cada año;

Q_{CH_4} : generación máxima de metano $\left[\frac{m^3}{\text{año}} \right]$;

k : índice de generación de metano $\left[\frac{1}{\text{año}} \right]$;

L_0 : generación potencial de metano $\left[\frac{m^3}{\text{Mg}} \right]$;

M_i : masa de residuos sólidos dispuestos en el año i [Mg];

$t_{i,j}$: periodo en que los RSU totales M_i : dispuestos en el año i , con incrementos j ;

De la tasa de RSU depositados en un relleno sanitario, las emisiones de metano pueden ser estimadas suponiendo que de L_0 es $170 \left[\frac{m^3}{\text{Mg}} \right]$ y k es $0,05 \left[\frac{1}{\text{año}} \right]$. Estos valores son recomendados para países en vía de desarrollo en los cuales la composición de los RSU corresponde con una fracción alta de residuos orgánicos. Para rellenos sanitarios a cielo abierto, el potencial de emisión de metano puede asumirse como el 50% del valor de rellenos sanitarios controlados y cubiertos, o el promedio equivalente a $85 \left[\frac{m^3}{\text{Mg}} \right]$. [55]

El índice de generación de metano k , representa la tasa de biodegradación de los residuos orgánicos de primer orden en la cual el metano es generado luego de disponer finalmente los RSU en el relleno. Este parámetro depende del contenido de humedad, de la disponibilidad de nutrientes, el pH y la temperatura. El contenido de humedad es importante ya que funciona como transporte de nutrientes y bacterias. La humedad en el relleno depende de la infiltración de las lluvias, la cobertura, el tipo de impermeabilización de la base del sistema, la recirculación de lixiviados y la profundidad del vertido. [56]

Las tasas de degradación más rápidas (de 3 años aproximadamente) están asociadas a condiciones de alta humedad y de residuos de degradación muy rápida como los alimentos. Las tasas más lentas, están asociadas a residuos como el papel y el cartón de degradación lenta, con un periodo de degradación cercano a 35 años. [57]

El parámetro L_0 , llamado potencial de generación de metano, estima la cantidad de metano potencialmente producida por un kilogramo de RSU cuando son degradados, por lo cual depende de la caracterización física-química de los RSU en porcentaje en pesos y masas, en particular, debido a la fracción orgánica presente en los RSU. Este parámetro se presenta en la (Ec. 49). Su valor se estima a partir del contenido de carbono y el factor de conversión estequiométrico. A mayor contenido de celulosa, mayor será el valor de L_0 . [16] [58]

$$L_0 = (MCF) \cdot (DOC) \cdot (DOC_F) \cdot (F) \cdot \left(\frac{16}{12}\right) \quad (\text{Ec. 49})$$

donde:

MCF : factor de corrección para el metano

DOC fracción de carbono orgánico degradable

DOC_F : fracción de carbono orgánico degradable asimilado

F : fracción de metano en el biogás

$\frac{16}{12}$: constante estequiométrica.

El factor de corrección para el metano MCF es un ajuste para estimar la generación de biogás que el modelo toma en cuenta ya que depende del grado de degradación anaeróbica de los RSU. Este valor depende de la profundidad y el tipo de relleno sanitario (controlado, no controlado, a cielo abierto, etc) y las prácticas de gestión y manejo asociadas a él. La Tabla 23 expone los valores típicos del parámetro MCF . [58]

Tabla 23. Valores estimados del parámetro MCF . Adaptado de [58].

Descripción del sitio	Profundidad < 5 m	Profundidad ≥ 5 m
No controlado	0,4	0,8
Controlado	0,8	1,0
Semi- aeróbico	0,4	0,5
Condición desconocida	0,4	0,8

Los valores estimados del factor de carbono orgánico degradable DOC depende de la composición de los RSU, por lo cual varía de acuerdo a cada relleno sanitario y cada país. Este parámetro se estima según la (Ec. 50). [16] [58] [59]

$$DOC = 0,40(A) + 0,17(B) + 0,15(C) + 0,30(D) \quad (\text{Ec. 50})$$

donde:

A : porcentaje de los residuos que corresponde al papel, cartón y los textiles

B : porcentaje de los residuos que corresponde a los desechos de jardín y de los parques u otros desechos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos)

C : porcentaje de los residuos que corresponde a los restos de alimentos

D : porcentaje de los residuos que corresponde a madera.

El parámetro fracción de carbono orgánico degradable asimilado DOC_F , se calcula mediante la ecuación (Ec. 51).

$$DOC_F = 0,014T + 0,28 \quad (\text{Ec. 51})$$

donde:

T : temperatura. [°C]

La (Ec. 51) está basada en el modelo teórico que varía sólo con la temperatura en la zona anaerobia del relleno sanitario. El valor predeterminado utilizado por la IPCC es de 0,77. No obstante, este factor puede variar desde 0,42 para 10°C hasta 0,98 para 50°C. De hecho, en muchos rellenos sanitarios profundos (>20 m) las temperaturas que se han registrado son mayores a 50 °C, lo que implica condiciones claramente anaerobias. La fracción de metano en el biogás k : depende de la cantidad de metano contenido en el biogás. Normalmente este parámetro oscila entre 40 a 60%. [15] [57]

MODELO GASSIM

Este modelo se encuentra integrado mediante un software de libre licencia en su versión beta, el cual modela el impacto ambiental provocado por los rellenos sanitarios. Tiene como objetivo ser una herramienta para estimar las emisiones anuales de biogás, diferentes especies tóxicas y otras sustancias generadas en un relleno sanitario.

Este modelo es aceptado desde 1998 como referencia por la agencia de medio ambiente británica para la evaluación de emisiones en rellenos sanitarios (el uso de otros modelos debe ser justificado, mientras que los resultados obtenidos por *GasSim* son aceptados directamente).

El software entrega un reporte de 45 especies diferentes las cuales son listadas en un reporte de 25, 50 y 75 percentiles. Los resultados del 50 percentil pueden ser utilizados para analizar las emisiones en escenarios no controlados [60].

El modelo se divide en dos módulos. El primer módulo define el tipo de residuos a analizar y el segundo se refiere a las emisiones generadas por el relleno sanitario. El biogás generado se calcula mediante el análisis del tipo de residuos depositados y su caracterización elemental [60].

El modelo *GasSim* estima la generación del biogás del relleno y otras especies, a partir de la composición de los RSU y el tiempo de llenado de la celda en uso del relleno sanitario. También estima mediante modelos de dispersión, el impacto en los alrededores cuando se implementan medidas de gestión como antorchas y motores de combustión interna. La representación de la incertidumbre (estadísticamente) es determinada mediante el método de Montecarlo, como se mencionó anteriormente.

MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS

El Modelo está basado en una ecuación de degradación de primer orden. Este modelo requiere que el usuario alimente datos específicos tales como el año de apertura, año de clausura, índices de disposición anual, ubicación del sitio y contestar algunas preguntas referente a las condiciones físicas pasadas y presentes del sitio. El modelo provee automáticamente valores para cada uno de los 33 departamentos en Colombia. Los parámetros utilizados por el software, fueron desarrollados usando datos específicos de clima, caracterización de residuos y prácticas de disposición de residuos de Colombia y estima el efecto de estas condiciones en las cantidades e índices de generación de biogás. También se evaluó información de recuperación de biogás actual en dos rellenos sanitarios en Colombia para estimar los valores de k y L_0 . El Modelo fue desarrollado con el objetivo de proveer proyecciones de generación y recuperación de biogás más exactas y conservadoras aplicadas al caso Colombiano. El modelo colombiano de biogás está basado en el modelo mexicano de biogás Versión 2.0 y el modelo de residuos 2006 del IPCC. La (Ec. 52) presenta el modelo Colombiano de biogás.

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F) \quad (\text{Ec. 52})$$

donde:

Q_{LFG} : flujo de biogás máximo esperado $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$;

i : incremento en tiempo de 1 año;

n : año del cálculo- año inicial de disposición de residuos;

j : incremento de tiempo en 0,1 años;

k : índice de generación de metano $\left[\frac{1}{\text{año}} \right]$;

L_0 : generación potencial de metano $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{Mg}} \right]$;

M_i : masa de residuos dispuestos en el año i [Mg];

t_{ij} : edad de la sección j de la masa de residuos M_i dispuesta en el año i ;

MCF : factor de corrección de metano;

F : factor de ajuste por incendios.

El modelo estima el índice de generación de biogás para cada año usando la ecuación de degradación de primer grado, la cual fue modificada por *US-EPA* en el Modelo *LandGEM* versión 3.02 del 2005. El modelo aplica ecuaciones separadas para calcular la generación de cada uno de los cuatro grupos de residuos orgánicos agrupados de acuerdo a su índice de degradación, como se muestra a continuación:

- Residuos de degradación muy rápida – residuos alimenticios, otros orgánicos, 20% de los pañales;
- Residuos degradación moderadamente rápida – residuos vegetales, poda de casas o parques municipales, papel higiénico;
- Residuos degradación moderadamente lenta – papel, cartón, textiles;
- Residuos degradación muy lenta – madera, caucho. piel, huesos, paja.

La generación de biogás total es calculada como la suma de las cantidades de generación de biogás de cada una de las cuatro categorías de residuos. Las categorías de clima para las ciudades más grandes en Colombia son:

- Bogotá – moderadamente seco;
- Medellín – Húmedo;
- Cali – moderadamente mojado;
- Barranquilla – moderadamente seco;
- Cartagena – moderadamente seco a moderadamente húmedo.

4.1.2 Medición directa del biogás generado en el relleno

Conocer la composición del biogás captado es de gran utilidad, fundamentalmente para determinar la viabilidad del aprovechamiento energético en el relleno y su aplicación en moto-generadores, ya que el nivel de dióxido de carbono disminuye el poder calorífico del biogás y por lo tanto, afecta las curvas de rendimiento del sistema de generación. Las variables que se miden son:

- Contenido de metano;
- Entrada de aire en el relleno;
- Nivel de humedad en el biogás;
- Presencia de compuestos corrosivos;
- Presencia de compuestos tóxicos para la salud.

Dada la composición heterogénea de los RSU, la distribución en el relleno, la colonización de microorganismos, la presencia de lixiviados, y otras variables, la composición del biogás varía de un punto a otro en el relleno. Por eso, es necesario realizar análisis de muestras en distintos puntos del relleno sanitario, durante un periodo de tiempo considerable para evitar errores inducidos en la toma de datos.

Los equipos portátiles de análisis y mediciones, suministran por lo menos las concentraciones de metano, dióxido de carbono y oxígeno (obteniéndose el nivel de nitrógeno por diferencia). Normalmente tienen una precisión de $\pm 1\%$ volumen de gas seco. La técnica empleada por los equipos portátiles para la medición de las trazas de gases, es la técnica de los rayos infrarrojos, ya que el metano y el dióxido de carbono son gases que absorben la luz infrarroja. Para la detección de oxígeno, normalmente se utilizan detectores que aprovechan sus propiedades paramagnéticas, finalmente el nitrógeno se calcula por la diferencia estequiométrica. En este proyecto no se tuvo en cuenta el modelo de asentamiento de RSU. Para mayor información se recomienda [53].

4.2 EVALUACIÓN ESCENARIO TÉCNICO 3

A continuación, se presenta la evaluación de los tres modelos de estimación de biogás generado en rellenos sanitarios, aplicado al relleno La Glorita como se expuso anteriormente. Las mediciones *in situ* acerca de la composición del biogás, fueron realizadas por la empresa encargada de operar el relleno sanitario. Los resultados de las mediciones reales y la composición del biogás se presentan en el anexo 5.

4.2.1 Resultados simulación modelo *LandGEM*

Las condiciones que se utilizaron para realizar la simulación de generación de biogás del relleno sanitario La Glorita, se presentan en la Tabla 24. Las condiciones iniciales fueron determinadas mediante visitas al relleno sanitario y por correo electrónico con la empresa operadora.

Tabla 24. Condiciones iniciales para la estimación del biogás mediante el modelo *LandGEM*.

Descripción	Valor parámetro
Nombre del relleno sanitario	La Glorita
Año de apertura	1997
Año proyectado de cierre	2033
Capacidad del relleno proyectada	10736 [Mg]
Índice de generación de metano k	0,04 $\left[\frac{1}{\text{año}}\right]$
Generación potencial de metano L_0	100 $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{Mg}}\right]$
Concentración de componentes volátiles orgánicos no metanos - <i>NMOCs</i>	600 [ppmv] como hexanos
Contenido de metano estimado	54%
Especies de estudio	Biogás total, metano, dióxido de carbono, <i>NMOCs</i>

A partir de la información obtenida, se presenta la cantidad de RSU dispuestos anualmente en el relleno sanitario La Glorita. Los valores se muestran en la Tabla 25. Esta información corresponde a una condición inicial que es aplicada en los tres modelos evaluados.

Tabla 25. Cantidad estimada de RSU depositados finalmente en el relleno sanitario La Glorita.

Año	$\left[\frac{\text{Mg}}{\text{año}} \right]$	Cantidad RSU acumulada [Mg]
1997	146 000	0
1998	149 066	146 000
1999	152 196	295 066
2000	155 393	447 262
2001	158 656	602 655
2002	161 988	761 311
2003	165 389	923 298
2004	168 862	1 088 687
2005	172 409	1 257 550
2006	176 029	1 429.958
2007	179 726	1 605.988
2008	183 500	1 785.713
2009	255 500	1 969.213
2010	260 866	2 224.713
2011	266 344	2 485.579
2012	271 937	2 751.922
2013	277 648	3 023.859
2014	283 478	3 301.507
2015	289 431	3 584 985
2016	295 509	3 874 416
2017	301 715	4 169 926
2018	310 766	4 471 640
2019	320 089	4 782 407
2020	329 692	5 102 496
2021	339 583	5 432 188
2022	349 770	5 771 771
2023	360 263	6 121 542
2024	371 071	6 481 805
2025	382 203	6 852 876
2026	393 670	7 235 080
2027	405 480	7 628 749
2028	417 644	8 034 229
2029	430 173	8 451 873

Tabla 25. Cantidad estimada de RSU depositados finalmente en el relleno sanitario La Glorita anualmente- continuación.

Año	$\left[\frac{\text{Mg}}{\text{año}} \right]$	Cantidad RSU acumulada [Mg]
2030	443 079	8 882 047
2031	456 371	9 325 125
2032	470 062	9 781 496
2033	484 164	10 251 558
2034	0	10 735 722

El anexo 6 presenta los resultados completos del modelo *LandGEM* del relleno sanitario La Glorita, que se resumen en la Figura 23.

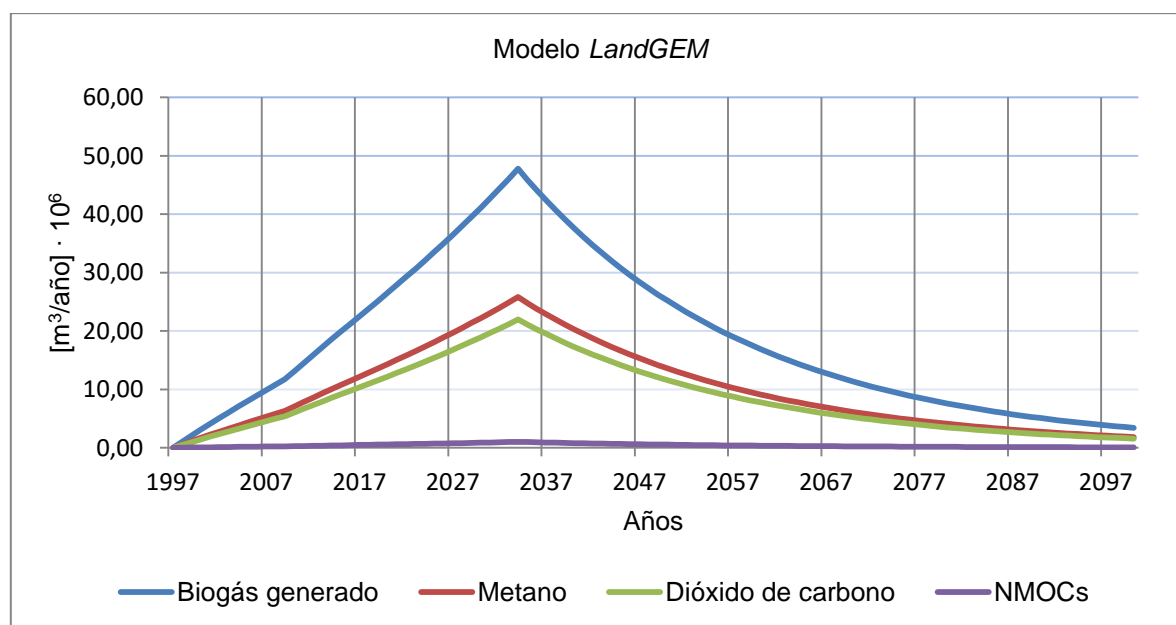


Figura 23. Especies generadas en el relleno La Glorita mediante el modelo *LandGEM*.

Según los resultados presentados en la Figura 23, la curva de generación crece hasta obtener un valor máximo de biogás obtenido de $47,78 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$ proyectado para el año 2034, un año después de la clausura del relleno sanitario. Así mismo, la cantidad máxima de metano obtenida es de $25,8 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$ y el dióxido de carbono generado es $22 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$. Como se observa en la curva de generación, la fracción correspondiente a los NMOCs es baja.

A partir de los resultados se concluye que la generación de metano empieza a disminuir tan pronto cierran el relleno sanitario, no obstante la emisión de gases se proyecta hasta casi el año 2100 ya que los elementos como el papel y el cartón son de degradación lenta y pueden seguir generando biogás hasta 10 años después de ser depositados.

La generación de lixiviados y el modelado no se tuvo en cuenta en esta simulación debido a la escases en la información recopilada y las dificultades de las mediciones *in situ*. Así mismo, el fenómeno de migración de biogás por los costados no se tuvo en cuenta en este trabajo de grado. Después del año 2033, año en el que se proyecta la clausura del relleno sanitario, es importante controlar el relleno sanitario aislándolo de la atmosfera y evitando que las lluvias generen filtración de aguas al relleno. La ausencia del aislamiento superficial puede generar que las aguas contaminadas con metales pesados se filtren al subsuelo y generan contaminación de fuentes subterráneas y daños a los ecosistemas.

4.2.2 Resultados simulación modelo *GasSIM*

La simulación de generación de biogás del relleno La Glorita según el modelo *GasSIM* se realizó teniendo en cuenta las condiciones iniciales presentadas en la Tabla 26.

Tabla 26. Condiciones iniciales para la estimación del biogás mediante el modelo *GasSIM*.

Descripción	Valor parámetro
País	Colombia
Nombre del relleno sanitario	La Glorita
Año de apertura	1997
Año proyectado de cierre	2033
Periodo de simulación	103 años (hasta el 2100)
Capacidad del relleno proyectada	10 736 [Mg]
Número de iteraciones del programa	100
Área proyectada (expuesta)	550 250 [m ²]
Contenido de metano estimado mediante distribución uniforme	54%
Tipo de aislamiento de la celda con la atmósfera	Compuesta, mediante arcilla de 1m de espesor y recubrimiento plástico de 10mm.
Tipo de aislamiento de la celda con la tierra	Compuesta mediante arcilla de 1m de espesor y recubrimiento plástico de 10mm.
Caracterización RSU	Se modificaron los parámetros por defecto ya que el software es desarrollado para Reino Unido. Los valores son los presentados en la figura 7.
Cantidad de RSU depositados	El software se modificó para tener en cuenta los valores presentados en la Tabla 25.
Especies de estudio	Biogás total, metano, dióxido de carbono, NMOCs

El anexo 7 presenta los resultados completos de la simulación mediante el modelo *GasSIM* para el relleno sanitario La Glorita. Los resultados de la simulación del modelo *GasSIM* se resumen en la Figura 24.

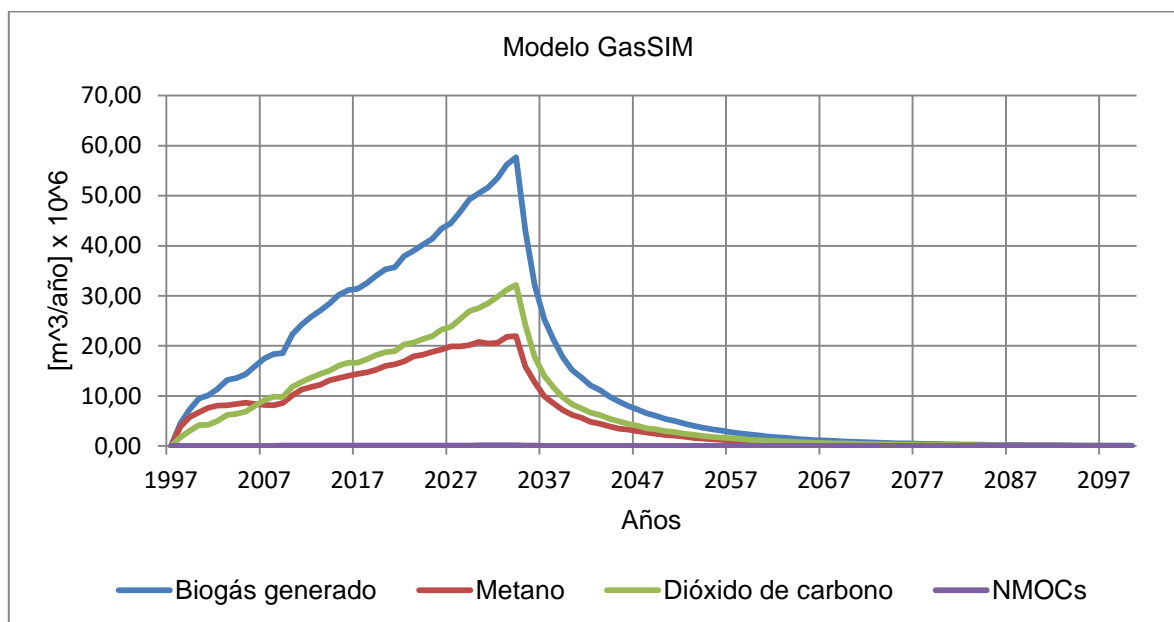


Figura 24. Especies generadas en el relleno La Glorita mediante el modelo *GasSIM*.

Según los resultados presentados en la Figura 24, la curva de generación de biogás crece hasta alcanzar un valor máximo estimado en $57,7 \cdot 10^6 \left[\frac{m^3}{año} \right]$ proyectado para el año 2034, un año después de la clausura del relleno sanitario. La cantidad máxima de metano obtenida es de $22 \cdot 10^6 \left[\frac{m^3}{año} \right]$ y el dióxido de carbono generado es $32,1 \cdot 10^6 \left[\frac{m^3}{año} \right]$.

Como se observa en la curva de generación, la fracción correspondiente a los *NMOCs* es baja, siendo los resultados coherentes al ser comparados con los obtenidos mediante el modelo *LandGEM*.

Los parámetros relacionados con la generación de lixiviados, las migraciones laterales de biogás y el aprovechamiento energético en antorchas o motores de combustión interna no se tuvieron en cuenta en este análisis a pesar de que el software permite modelar estas condiciones. Esto debido a la poca disponibilidad de la información relacionada con el relleno sanitario.

No obstante, si se tuvo en cuenta la caracterización de los RSU del relleno sanitario La Glorita según los presentados en la Figura 7 ya que el software permite modificar la composición de los residuos.

Para mayor interés, una versión beta del software puede ser descargada directamente del enlace web: <http://www.gassim.co.uk/Download.html>.

4.2.3 Resultados simulación modelo colombiano de biogás

La simulación se realizó con los parámetros iniciales que se presentan en la Tabla 27. El anexo 8 presenta los resultados del modelo colombiano aplicado al relleno sanitario La Glorita.

Tabla 27. Condiciones iniciales para la estimación del biogás mediante el modelo colombiano.

Descripción	Valor parámetro
Región	2- Andina
Nombre del relleno sanitario	La Glorita
Año de apertura	1997
Año proyectado de cierre	2033
Disposición anual del año más reciente	292000 [Mg]
Densidad de los RSU depositados	0,34 $\left[\frac{\text{Mg}}{\text{m}^3}\right]$
Precipitación anual promedio	> 2000 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{año}}\right]$
Crecimiento anual estimado de RSU	2,1%
Contenido de metano estimado	54%
Especies de estudio	Biogás, metano, dióxido de carbono y NMOCs
Eficiencia en la captura de biogás	77%

Los resultados gráficos de la simulación del modelo colombiano se presentan en la Figura 25.

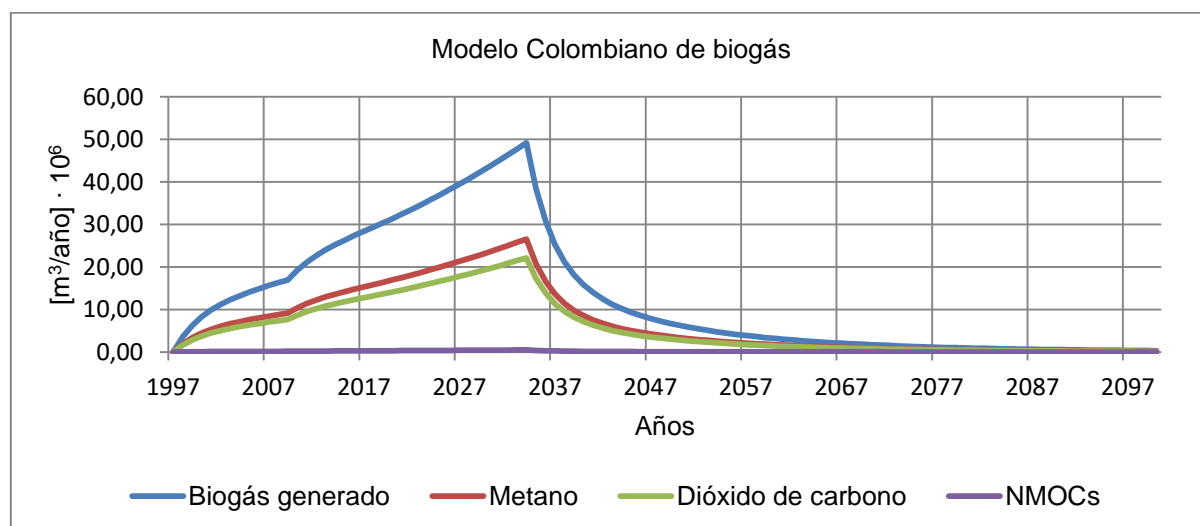


Figura 25. Especies generadas en el relleno La Glorita mediante el modelo colombiano.

Según los resultados presentados en la Figura 25, la curva de generación crece hasta obtener un valor máximo de biogás generado de $49,19 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$ para el año 2034, un año posterior al cierre del relleno sanitario. Así mismo, la cantidad máxima de metano estimada para este año es de $26,6 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$ y el dióxido de carbono generado es $22,1 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$. Como se observa en la curva de generación, la fracción correspondiente a los NMOCs es baja. Estos resultados son muy cercanos a los obtenidos con el modelo *GasSIM*.

4.3 APLICACIONES DEL BIOGÁS

A partir de la cantidad estimada de biogás generado en el relleno La Glorita, se procede a calcular el poder calorífico del combustible para posteriormente ser utilizado en aplicaciones de motogenerador.

El poder calorífico del biogás captado del relleno de la ciudad de Pereira se calcula mediante la diferencia de entalpías ΔH_c de los reactivos $\bar{h}_{f,R}$ y los productos de la combustión $\bar{h}_{f,P}$, tal como se presenta en la (Ec. 53), siendo $n_{j,R}$ y $n_{j,P}$ las fracciones molares de los reactivos y productos de la combustión.

$$\Delta H_c = \bar{h}_{f,R} - \bar{h}_{f,P} = PCI = \sum_{j=1}^m n_{j,R} \cdot \bar{h}_{f,Rj}^o - \sum_{j=1}^m n_{j,P} \cdot \bar{h}_{f,Pj}^o \quad (\text{Ec. 53})$$

Para realizar la simulación de combustión, se utilizó el software *Gaseq* el cual es de carácter gratuito. Las condiciones de la simulación se presentan en la tabla 28.

Tabla 29. Condiciones iniciales para la simulación de combustión en el software *Gaseq*.

Descripción parámetro	Condición
Tipo de simulación	Reactor adiabático a presión constante
Temperatura de entrada de los reactivos	298 [K]
Temperatura de llama adiabática de los productos	1928 [K]
Presión del reactor	1 [atm]
Coefficiente estequiométrico ϕ	0,85
Especies reactivos	CH ₄ ; CO ₂ ; O ₂ ; CO; Aire estándar.

Para mayor información, una versión del programa puede ser descargada de:
<http://www.gaseq.co.uk/>

Tabla 30. Reactivos y productos generados en la reacción de combustión del biogás del relleno sanitario La Glorita.

Reactivos [moles]	→	Productos [moles]
CH ₄ = 0,5376		N ₂ = 4,5418
CO ₂ = 0,4179		H ₂ O = 1,0069
O ₂ = 0,0044		CO ₂ = 0,9498
CO = 3,4 · 10 ⁻⁴		CO = 0,0060
aire estandar = 5,8269		O ₂ = 0,1825
-		H ₂ = 0,0015
-		NO = 0,0169
-		NO ₂ = 1,018 · 10 ⁻⁵

Reemplazando los valores obtenidos de la simulación de combustión, en la (Ec. 53), se obtiene la (Ec. 54).

$$PCI = \left[0,53768 \overline{h_{f,CH_4}^o} + 0,41791 \overline{h_{f,CO_2}^o} + 0,000342 \overline{h_{f,CO}^o} \right] - \left[0,94984 \overline{h_{f,CO_2}^o} + 1,06896 \overline{h_{f,H_2O}^o} + 0,00601 \overline{h_{f,CO}^o} \right] \quad (Ec. 54)$$

De los valores de las tablas JANAF, las entalpías de formación de las especies consideradas en la simulación a T=298K son:

$$\begin{aligned} \overline{h_{f,CO}^o} &= -110,54 \left[\frac{MJ}{kmol} \right] & \overline{h_{f,H_2}^o} &= 0 \left[\frac{MJ}{kmol} \right] & \overline{h_{f,O_2}^o} &= 0 \left[\frac{MJ}{kmol} \right] \\ \overline{h_{f,N_2}^o} &= 0 \left[\frac{MJ}{kmol} \right] & \overline{h_{f,CO_2}^o} &= -393,52 \left[\frac{MJ}{kmol} \right] & \overline{h_{f,H_2O}^o} &= -241,83 \left[\frac{MJ}{kmol} \right] \end{aligned}$$

Finalmente reemplazando los valores de las entalpías de formación en la (Ec. 54) se obtiene el valor del poder calorífico.

$$PCI = 428,2015 \left[\frac{MJ}{kmol} \right]$$

Lo que es igual a:

$$PCI = 15,86 \left[\frac{MJ}{kg} \right] = 20,22 \left[\frac{MJ}{m^3} \right]$$

El poder calorífico estimado es coherente con los resultados presentados en [59], los cuales reportan un PCI del biogás captado de un relleno sanitario en España equivalente a $16 \left[\frac{MJ}{m^3} \right]$, siendo un poco menor ya que el contenido de metano estimado en el artículo fue determinado en 46% a diferencia del contenido de metano estimado en este proyecto equivalente a 54%.

Por otro lado, [55] presenta que el PCI del biogás de relleno oscila entre 13 y 23 $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}\right]$ con un contenido de metano del 50% aproximadamente, siendo coherente los resultados con los publicados en la literatura.

La cantidad estimada de biogás captado del relleno La Glorita fue presentada y el cálculo de su poder calorífico muestra que se puede aprovechar en aplicaciones de motogeneradores con el fin de generar electricidad mediante motores reciprocantes de combustión interna.

Los resultados que se presentan a continuación, corresponden a una adaptación del proyecto de investigación con desarrollado en Brasil titulado: “*Desenvolvimento de soluções tecnológicas a partir do biogás produzido em sistemas de tratamento de esgotos e aterros sanitários para a geração de energia elétrica. Rede Biogás (Edital FINEL 06/2010- Saneamento Ambiental e Habitação). Convênio FINEP: 23076.032233/2011-54*”.

Este proyecto consistió en diseñar un banco de purificación y filtración de biogás captado del relleno sanitario de la ciudad de Brusque, con un motor de ciclo Otto en V8 de 5,7 litros marca General Motors, el cual es acoplado a un generador eléctrico de 74 kVA. Se instaló un panel de control para realizar las mediciones del sistema de generación entre 10 y 60 kWe. El diagrama de flujo del proyecto diseñado se muestra en la Figura 26.

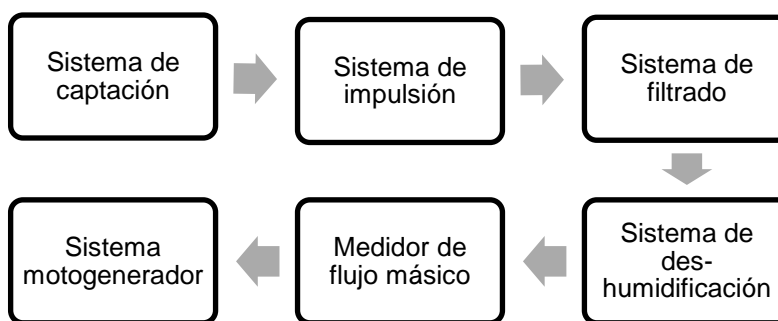


Figura 26. Diagrama de flujo de los diferentes sistemas para el aprovechamiento de biogás de relleno sanitario.

El sistema de purificación se diseñó con dos filtros de carbono activado y dos filtros de óxido ferroso, con el fin de limpiar las impurezas presentes en el biogás y evitar posibles daños en el sistema motogenerador. La Figura 27 muestra el esquema en CAD del sistema completo.

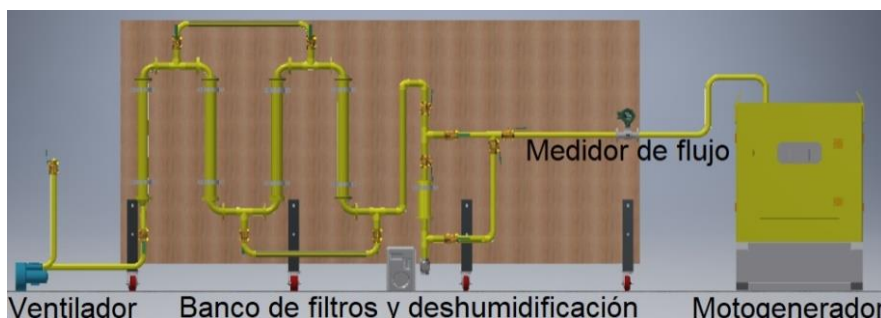


Figura 27. Esquema en CAD del sistema de aprovechamiento de biogás de relleno sanitario.

Se decidió utilizar los resultados del proyecto de la ciudad de Brusque, ya que el relleno sanitario recibe aproximadamente 800 toneladas de residuos sólidos diariamente, siendo un valor aproximado con el del relleno La Glorita. La figura 28 muestra el panel móvil del sistema construido para ser trasladado al relleno sanitario.



Figura 28. Banco de filtrado y purificación de biogás de relleno sanitario.

A partir de los resultados obtenidos del poder calorífico del biogás, se procede a calcular la potencia eléctrica generada por el sistema presentado. La potencia eléctrica fue estimada mediante la (Ec. 55). [55]

$$AE = (CLB) \cdot (LHV) \cdot \left(\frac{1}{HR} \right) \cdot (1 - PL) \cdot (AF) \quad (\text{Ec. 55})$$

donde:

AE : electricidad anual generada $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right]$;

CLB : volumen de biogás captado del relleno sanitario $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$;

LHV : poder calorífico inferior del biogás captado $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right]$;

HR : potencia utilizada por el motor de combustión interna para generar un kilovatio hora de electricidad, los rangos están entre 9,5 y 12,5 $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} \right]$;

PL : carga parasita: cantidad de electricidad utilizada por el compresor y otros elementos utilizados en el sistema de generación, normalmente están entre 0,04 a 0,08;

AF : eficiencia del motor, normalmente se asume entre 0,92 y 0,96, de acuerdo al equipo seleccionado y al mantenimiento.

Otro modelo propuesto para estimar la potencia eléctrica generada a partir del biogás captado del relleno sanitario es presentado en [13], como se muestra en la (Ec. 56).

$$\dot{W}_e = (LFG_{CH_4}) \cdot \left(\frac{100}{20,22} \right) \quad (\text{Ec. 56})$$

donde:

\dot{W}_e : potencia eléctrica generada $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right]$

LFG_{CH_4} : cantidad total de metano generado $\left[\frac{\text{Mg}}{\text{año}} \right]$

La potencia eléctrica total generada también puede ser determinada mediante el modelo Colombiano de biogás el cual arroja una eficiencia en la captura estimada en 77%. Los valores del metano captado hacen referencia a un promedio de los modelos de estimación de biogás presentados. Los resultados generales se presentan en el anexo 9 y se resumen en la Figura 29.

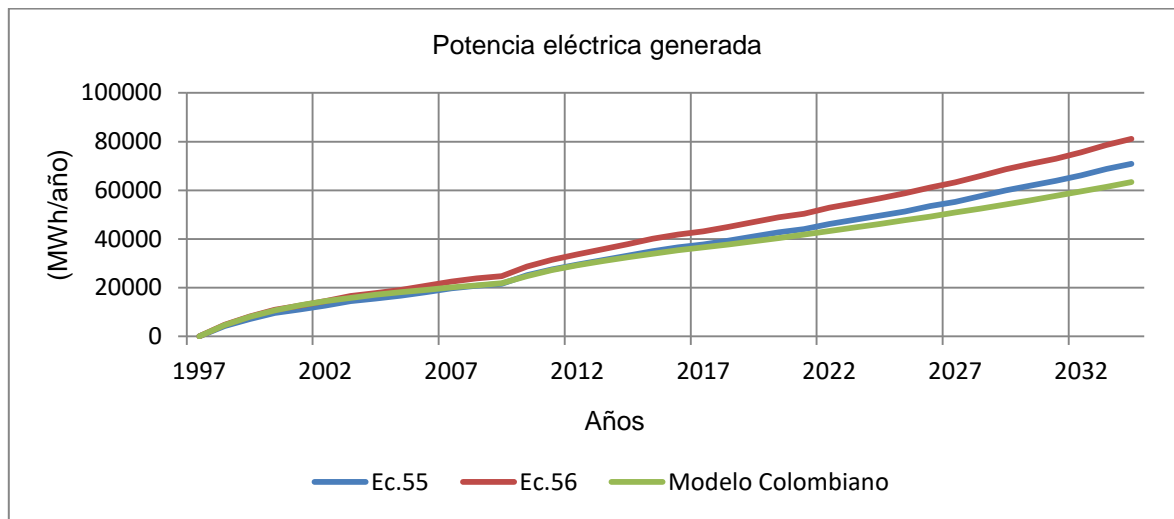


Figura 29. Potencia eléctrica generada por el biogás del relleno La Glorita.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentaron tres modelos de estimación de biogás a partir de la degradación de los RSU en el relleno sanitario La Glorita. Los resultados generales del biogás estimado de los modelos evaluados se presentan en la Figura 30. Los resultados obtenidos son coherentes con los publicados en [52] los cuales fueron obtenidos para un área específica del relleno sanitario Doña Juana mediante el modelo *EPA* y arrojaron un estimado de $34,5 \cdot 10^4 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$, siendo un valor coherente al ser comparado con el promedio del relleno sanitario La Glorita equivalente a $51,5 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$.

Según los resultados publicados por [55], para que un proyecto de generación de electricidad mediante motogeneradores con capacidades entre 800[kW] y 3 [MW] sea viable, el relleno sanitario debe captar biogás con una composición de 50% de metano y con caudales entre $4,4 \sim 16,5 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$.

Al comparar los resultados de la literatura con los obtenidos en este proyecto, finalmente se concluye que el relleno sanitario La Glorita tiene el potencial para generar electricidad como energía renovable del biogás captado de relleno sanitario. Esto es corroborado al analizar la Figura 29 al obtenerse capacidades coherentes con los resultados publicados en la literatura.

Como se observa en la Figura 30, a pesar de que la cantidad de biogás se estimó mediante tres modelos completamente diferentes, los resultados son similares y se puede concluir que convergen.

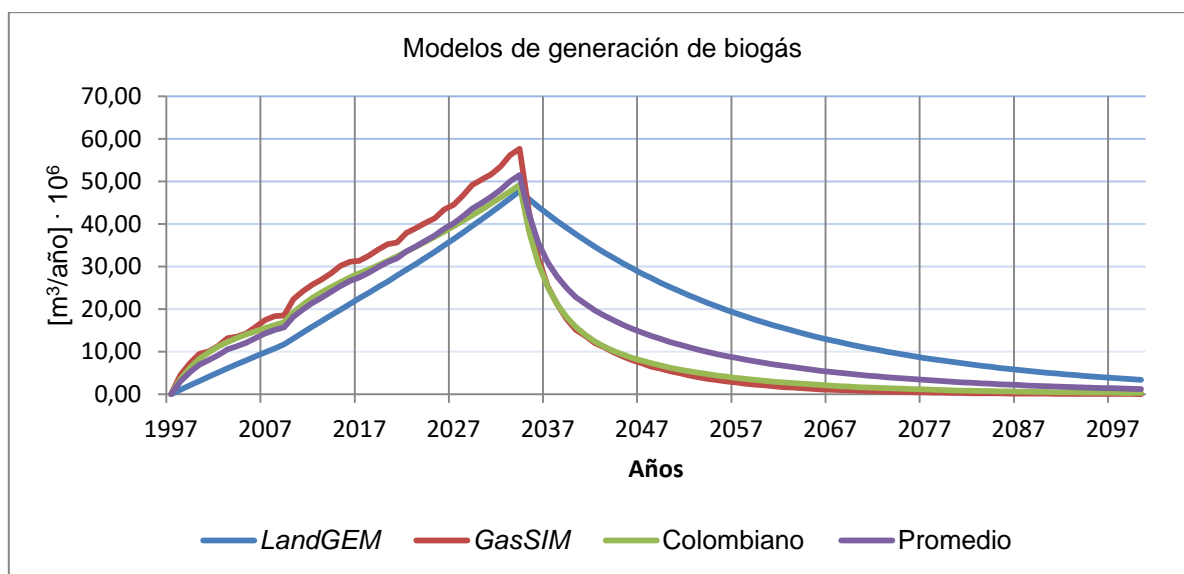


Figura 30. Modelos de generación de biogás del relleno sanitario La Glorita.

Por otro lado, al analizar las ventajas de cada modelo evaluado, se concluye que a pesar de que todos los tienden a valores similares, los modelos que representan mejor el fenómeno son el modelo colombiano y el modelo *GasSIM*.

El modelo colombiano tiene la ventaja de que fue desarrollado teniendo en cuenta las condiciones del país y estima automáticamente los diferentes parámetros asociados como lo son el índice de generación de metano k y el factor de generación potencial de metano L_0 , de acuerdo a la región de análisis del país. Así mismo permite obtener estimado de la capacidad de generación de electricidad en aplicaciones de motogeneradores según las proyecciones de captaciones simuladas. El modelo presenta la desventaja de que no permite caracterizar los RSU para cada caso específico de tal forma que el usuario los ingrese manualmente ya que el software está protegido y no permite realizar modificaciones al código. El modelo colombiano tampoco permite simular las condiciones del relleno como el nivel de compactación de residuos, el aislamiento superficial de los RSU y con los suelos, la generación de lixiviados, las migraciones laterales y otros factores asociados al fenómeno.

El software *GasSIM* es completo y de los modelos evaluados es el que mejor resultados ofrece ya que permite analizar diversas especies generadas en el proceso de degradación anaeróbica y analizar los fenómenos de dispersión y aprovechamiento energético, sea simplemente quemando el biogás captado en antorchas o en aplicaciones de generación eléctrica como motogeneradores.

Así mismo permite estimar el impacto ambiental causado por la liberación de dióxido de carbono de la planta de aprovechamiento del biogás captado.

Por contras, el modelo *GasSIM* necesita ser alimentado por muchos parámetros iniciales que en la mayoría de casos son desconocidos por los operadores de los rellenos sanitarios en Colombia y demandan de investigaciones para ser determinados. La escasa información referente al tema hace que aplicar el modelo sea complejo, también porque se necesita tener un conocimiento avanzado para obtener resultados coherentes del software ya que su uso no es tan intuitivo.

El modelo *LandGEM* a pesar de que es uno de los más aplicados, no permite caracterizar los RSU para casos específicos y tampoco tiene en cuenta las características como el tipo de celda, nivel de compactación, generación de lixiviados, migraciones laterales, entre otros.

No obstante, la ventaja del modelo *LandGEM* radica en que es un modelo de primer orden simple y esto lo hace fácil de implementar ya que no requiere conocer muchos parámetros para realizar la simulación y los resultados obtenidos corresponden con una buena aproximación del fenómeno real.

Se concluye que la disminución del impacto ambiental por la mitigación en la liberación de metano a la atmósfera, como se presenta en la Figura 31, es $60,1 \cdot 10^4$ [ton]. Teniendo en cuenta que el metano tiene un índice de calentamiento global 33 veces mayor que el dióxido de carbono según cifras del *IPCC*, esto es igual a $19,8 \cdot 10^6$ [ton] de dióxido de carbono equivalente en un horizonte de sucesos comprendido entre los años 1997 y 2100, proyectando el año de clausura del relleno sanitario para el año 2033.

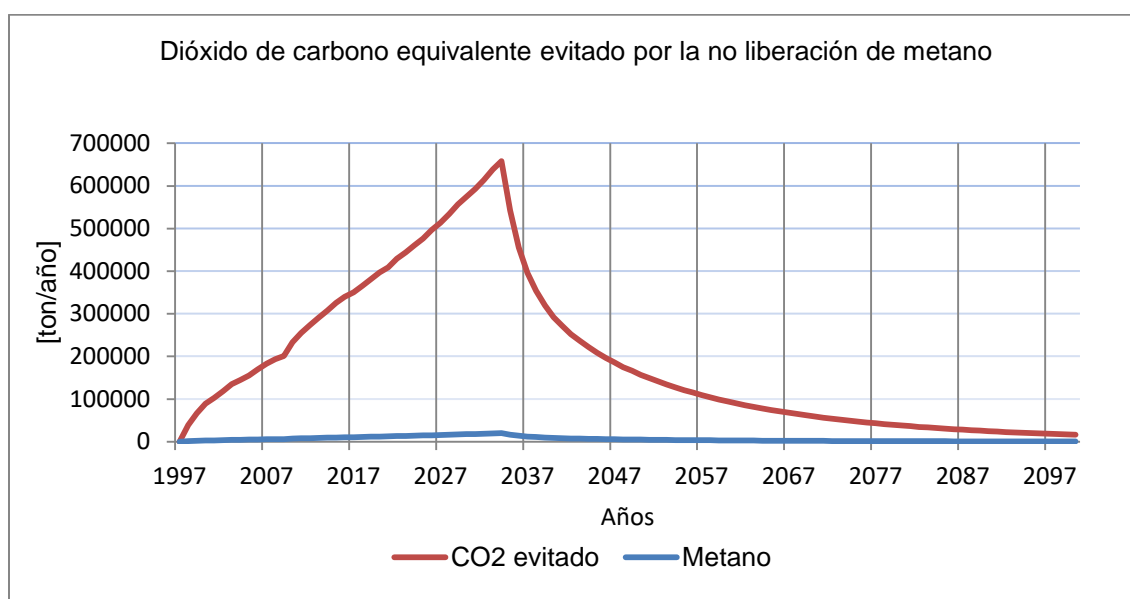


Figura 31. Dióxido de carbono equivalente evitado por la no liberación de metano.

Es importante resaltar que todo proyecto de aprovechamiento energético debe estar enmarcado dentro de las políticas de reducción de gases de efecto invernadero.

Actualmente la mayoría de gobiernos trabajan en políticas sociales con el fin de disminuir la cantidad de RSU depositados en los rellenos sanitarios y estimulan proyectos relacionados con el reciclaje. La dificultad de desarrollar tecnologías en el país que aprovechen energéticamente fuentes no renovables radica, entre otras cosas, en los escasos recursos que se invierten en investigación, la poca información referente al tema, la complejidad de la normativa nacional, entre otros factores.

De acuerdo a las razones expuestas, finalmente se concluye que es fundamental involucrar varios sectores como la academia y la industria privada, con el fin de realizar inversión en tecnologías alternativas y garantizar la viabilidad técnica y económica de este tipo de proyectos a mediano y largo plazo.

5. CONCLUSIONES

El documento presentó el desarrollo de los objetivos específicos, siguiendo la propuesta metodológica, en general, obteniendo resultados acorde con los presentados en la literatura.

La información utilizada para los cálculos termodinámicos y de los diferentes modelos propuestos, fue obtenida a partir de visitas técnicas a los administradores de los rellenos sanitarios acá estudiados, y de fuentes confiables como artículos especializados y editores como ELSEVIER, entre otros.

A partir de los resultados obtenidos en el cumplimiento del objetivo específico a, se concluye que la baja fracción de los residuos orgánicos (33%) de San Andrés y la alta fracción de los residuos derivados de plásticos, papeles y cartones (54%), la hacen ideal para utilizar la técnica de la incineración en la isla, aún más considerando el poco espacio disponible para la disposición final de los RSU debido a la pequeña extensión territorial y las altas tasas de generación de residuos por los grandes flujos de turistas a la isla. En contraste, la fracción de residuos orgánicos (44%) de Pereira es un estimativo que puede ser implementada como referencia para el análisis de un escenario de generación de biogás conservador, ya que el promedio nacional es superior a 50% de residuos orgánicos, siendo Bogotá la ciudad más representativa del país con una población de 10 millones de habitantes, la cual arrojó un estimado de la fracción de residuos orgánicos cercana al 61%, lo cual hace ideal la técnica de captación de biogás con valorización energética.

A partir de la caracterización de los residuos y el cálculo del poder calorífico estimado en $13,9 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$ para el escenario técnico 1 y $9,3 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$ para el escenario técnico 2, se concluye que son valores acordes a los publicados en investigaciones especializadas, los cuales los sitúan en un rango comprendido entre $5,2 \sim 12,5 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$, con un valor intermedio de $8,0 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$.

Al comparar los resultados obtenidos con los estimados en Finlandia $19,0 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$ según se presenta en [21], se concluye que siendo Finlandia un país pionero en el desarrollo de las técnicas *WtE*, el valor obtenido es alto ya que la fracción de residuos orgánicos es dispuesta en biodigestores para la producción de biogás y la fracción de residuos inertes es reciclada y reutilizada; por lo tanto la fracción que se incinera es la correspondiente a la de residuos inorgánicos como plásticos, cartones, telas y papeles.

Se concluye que la mejor configuración de planta de aprovechamiento, según los casos de estudio acá propuestos, corresponde con la técnica *cofiring* entre los RSU y el biogás del escenario técnico 2- caso D, obteniéndose un poder calorífico estimado en $23,3 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$, concluyendo que la técnica *cofiring* es altamente viable desde el punto de vista termodinámico.

Se concluye que las eficiencias del ciclo termodinámico de los casos de estudio presentados, corresponden a 17% para el escenario técnico 1 y 31% para el escenario técnico 2, siendo ambos resultados acordes con [19], [43] y [44]. en los que la eficiencia de ciclos avanzados es cercana al 38%.

Se concluye que la planta de San Andrés fue construida con el objetivo de incinerar los RSU, principalmente para disminuir el volumen que estos ocupan en la isla.

Según los resultados del modelo termodinámico propuesto para la planta de San Andrés, se concluye que teóricamente podría recuperar mayor energía de los RSU para generar electricidad, pero fue está condicionada para generar una potencia eléctrica máxima de 1,6MWe, de acuerdo a las características técnicas de la turbina.

Se concluye que a partir de la consistencia de los resultados obtenidos del escenario técnico 1, esta planta de aprovechamiento puede ser implementada a mayores escalas de generación electricidad.

A partir del análisis termodinámico, se concluye que la unidad condensadora con la que se pensaba rechazar el calor del ciclo, no fue bien dimensionada y por esa razón se pasó a construir un sistema adicional mediante torres de enfriamiento.

Se concluye que a partir de la revisión bibliográfica y del estado del arte, el modelo más utilizado es el *LandGEM US-EPA*, el cual se puede ver aplicado en los artículos publicados en [11], [27], [49], [59] y otros. El modelo *LandGEM* es el más utilizado para estimar la cantidad de biogás generado en rellenos sanitario de Estados Unidos, junto con el modelo del *IPCC*.

A partir de la revisión bibliográfica, se concluye que el modelo *GasSIM* es el más utilizado en Europa, debido a la precisión de los resultados obtenidos, los cuales tienen en cuenta múltiples variables y aproximaciones estadísticas basadas en el método de Montecarlo. El modelo es aceptado por la normativa del Reino Unido y en general en toda Europa.

Se concluye que los tres modelos convergen, estimando cantidades de biogás generado similares y son coherentes con los publicados en [52] los cuales fueron obtenidos para un área específica del relleno sanitario Doña Juana mediante el modelo *EPA* y arrojaron un estimado de $34,5 \cdot 10^4 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$, siendo un valor coherente al ser comparado con el promedio del relleno sanitario La Glorita equivalente a $51,5 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$.

Se concluye que los modelos que modelan mejor el fenómeno de generación de biogás, son el modelo colombiano y el modelo *GasSIM*.

Se concluye que el modelo colombiano presenta la desventaja, de no permitir cambiar la caracterización de los RSU según la condición de estudio, ya que el software está protegido contra modificaciones y no permite reescribir el código. El modelo colombiano tampoco permite simular las condiciones del relleno como el nivel de compactación de residuos, el aislamiento superficial de los RSU y con los suelos, la generación de lixiviados, las migraciones laterales y otros factores asociados al fenómeno.

Se concluye que el modelo más avanzado, es el *GasSIM* el cual permite simular fenómenos avanzados relacionados con el relleno sanitario, como la generación de lixiviados, las migraciones laterales y dispersión atmosférica por la implementación de una planta de aprovechamiento energético. Este software es el que mejor resultados ofrece ya que permite analizar diversas especies generadas en el proceso de degradación anaeróbica.

Se concluye que el modelo *GasSIM* presenta como desventaja, el conocimiento previo de muchos parámetros del relleno sanitario y los RSU a simular, que en la mayoría de casos son desconocidos por los operadores de los rellenos sanitarios en Colombia y demandan de mediciones rigurosas para ser determinados. La escasa información referente al tema hace que aplicar el modelo sea complejo, también porque se necesita tener un conocimiento avanzado del software para obtener resultados coherentes.

Se concluye que el valor del poder calorífico del biogás, estimado en $16 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$, equivalentes a $20,2 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right]$, es coherente según los resultados publicados en [55], caracterizado en un rango entre $13 \sim 23 \left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right]$. Se concluye que la metodología utilizada para estimar poder calorífico de este combustible, es adecuada según las condiciones del escenario técnico planteado.

Se concluye que la técnica de aprovechamiento energético del biogás es técnicamente viable, en un proyecto de generación de por lo menos 4 [MWe] , equivalentes a $35000 \left[\frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]$.

Finalmente se resalta que se cumplieron todos los objetivos específicos propuestos en este trabajo de grado, y como resultado de la investigación, se proponen algunas recomendaciones para futuras investigaciones a desarrollar.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio termo-económico y termo-ambiental enfocado en ciclos de vida, con el fin de evaluar las técnicas acá presentadas.

Se recomienda refinar el modelo de captación de biogás teniendo en cuenta las épocas de sequía y los bajos niveles de pluviosidad provocada en Colombia por los fenómenos climáticos como el niño.

Se recomienda investigar el diseño de un banco de purificación del biogás aumentando el contenido de metano hasta en un 98% con el fin de utilizarlo en aplicaciones vehiculares y de transporte.

Se recomienda realizar un estudio CFD de la distribución de la temperatura y presión en los incineradores y post-combustores, variando la relación exceso de aire y la relación *cofiring*.

Se recomienda realizar un análisis exergético y exergoambiental de los ciclos térmicos aquí presentados.

REFERENCIAS

- [1] Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE, «Estudios Postcensales 7. Proyecciones nacionales y departamentales de población 2005-2020,» Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Marzo 2010. [En línea]. Available: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/7Proyecciones_poblacion.pdf. [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [2] B. Mundial, «World Bank- GDP growth (annual %),» [En línea]. Available: <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?locations=CO>. [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [3] M. C. C. Sarmiento, «D WASTE- Waste Managemente for everyone,» 24 Octubre 2012. [En línea]. Available: <http://www.d-waste.com/new-infographics/item/114-solid-waste-management-in-colombia.html>. [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [4] Super Intendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, «Disposición final de residuos sólidos,» 12 2015. [En línea]. Available: <http://www.superservicios.gov.co/content/download/10760/88380>. [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [5] W. P. Qin y e. al, «Waste-to-Energy (WTE) network synthesis for Municipal Solid Waste (MSW),» *Energy Conversion and Management*, vol. 85, nº 0196-8904, pp. 866-874, 2015.
- [6] H. A. Arafat y e. al, «Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 105, nº 0959-6526, pp. 233-240, 2015.
- [7] Sociedad Productora de Energía de San Andrés y Providencia S.A E.S.P , «Planta de Generación RSU,» SOPESA S.A E.S.P, 2010. [En línea]. Available: <http://www.sopesa.com/proyectos/planta-de-generacion-rsu>. [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [8] F. Passarini y e. al, «Environmental impact assessment of a WtE plant after structural upgrade measures,» *Waste Management*, vol. 34, nº 0956-053X, pp. 753-762, 2014.
- [9] K. M. Noguera y J. T. Olivero, «Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano,» *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 34 (132), nº ISSN 0370-3908, pp. 347-356, 2010.
- [10] Super Intendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, «Disposición final de residuos sólidos en Colombia 2013,» Imprenta Nacional de Colombia- ISBN: 978-958-58203-6-4, Bogotá, 2013.

- [11] N. J. Themelis y P. A. Ulloa, «Methane generation in landfills,» *Renewable Energy*, vol. 32, nº 0960-1481, p. 1243–1257, August 2007.
- [12] S. Teixeira y e. al, «Prospective application of municipal solid wastes for energy production in Portugal,» *Energy Policy*, vol. 71, nº 0301-4215, pp. 159-168, 2014.
- [13] N. Bolan y e. al, «Landfills as a biorefinery to produce biomass and capture biogas,» *Bioresource Technology*, vol. 135, nº 0960-8524, p. 578–587, 2013.
- [14] Environmental Protection Agency-EPA, International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Projects, United States: Global Methane Initiative- EPA- ISWA, 2012.
- [15] G. I. d. E. s. C. C. IPCC, «Cambio climático 2014- Mitigación del cambio climático,,» IPCC, Berna-Suiza, 2015.
- [16] S. M. Gonzales, Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: análisis de variables y modelización, Gijón, España: Tesis Doctoral- Universidad de Oviedo, 1997.
- [17] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Mejores técnicas disponible de referencia Europea para la incineración de residuos, Madrid, España: ISBN: 978-84-491-1147-1, 2011.
- [18] M. T. Yunuen, Incineración de residuos biológico infecciosos, su efecto sobre la salud y ambiente, Tesis, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de Mexico, 2010.
- [19] T. Solheimslid y e. al, «Calculation of first-law and second-law-efficiency of a Norwegian combined heat and power facility driven by municipal waste incineration – A case study,» *Energy Conversion and Management*, vol. 95, nº 0196-8904, pp. 149-159, 2015.
- [20] S. A. S. A. Kadir y e. al, «Incineration of municipal solid waste in Malaysia: Salient issues, policies and waste-to-energy initiatives,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, nº 1364-0321, pp. 181-186, 2013.
- [21] M. Horttanainen y e. al, «The composition, heating value and renewable share of the energy content of mixed municipal solid waste in Finland,» *Waste Management*, vol. 33, nº 0956-053X, p. 2680–2686, 2013.
- [22] H. ZakirHossain y e. al, «Municipal solid waste (MSW) as a source of renewable energy in Bangladesh: Revisited,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, nº 1364-0321, pp. 35-41, 2014.
- [23] M. M. V. Leme y e. al, «Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 87, nº 0921-3449, pp. 8-20, 2014.

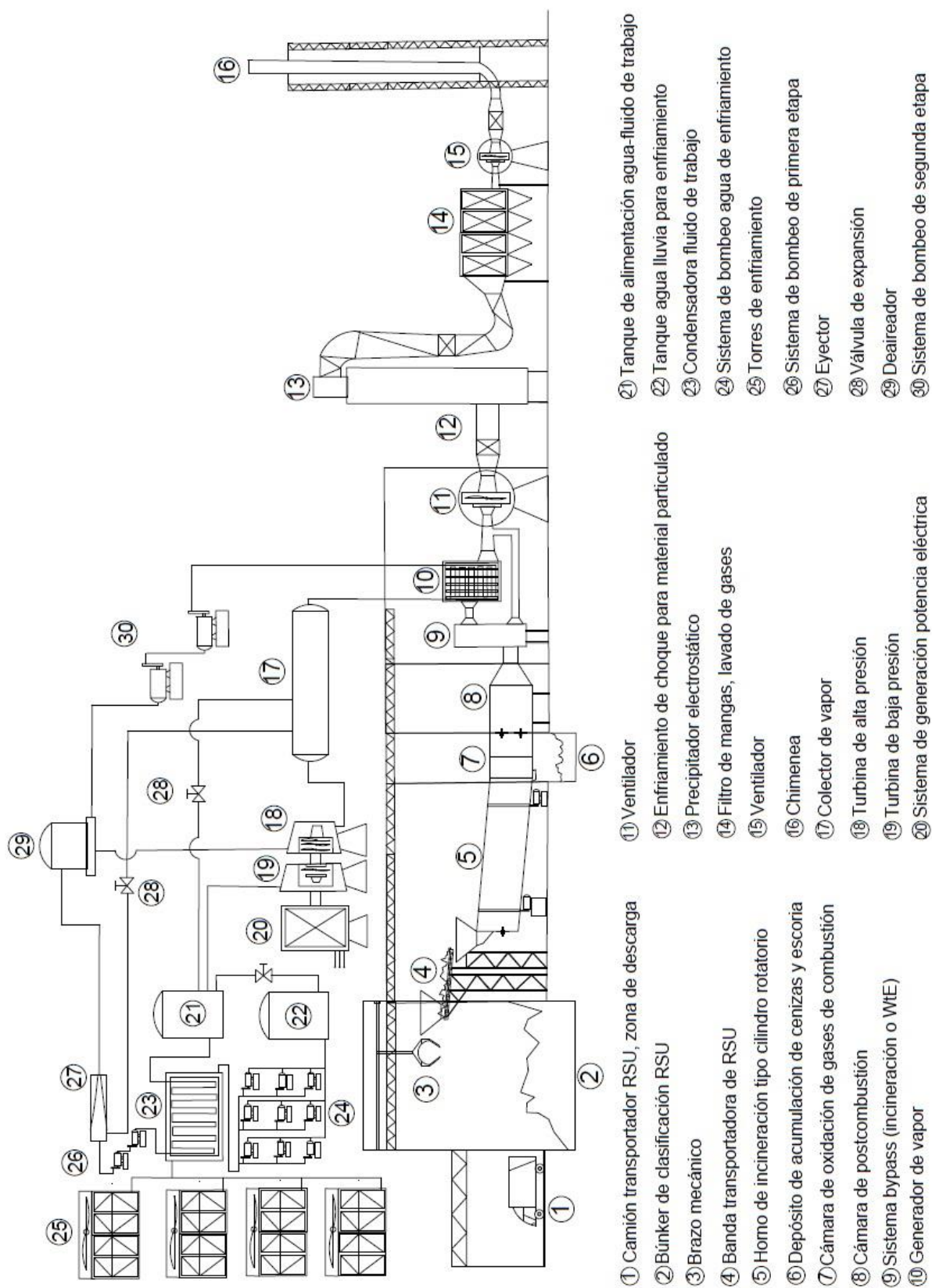
- [24] C. Bidart y e. al, «Municipal solid waste and production of substitute natural gas and electricity as energy alternatives,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, nº 1359-4311, pp. 1107-1115, 2012.
- [25] C. Ofori-Boateng y e. al, «The prospects of electricity generation from municipal solid waste (MSW) in Ghana: A better waste management option,» *Fuel Processing Technology*, vol. 110, nº 0378-3820, pp. 94-102, 2013.
- [26] R. Singh y e. al, «An overview for exploring the possibilities of energy generation from municipal solid waste (MSW) in Indian scenario,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, nº 1364-0321, p. 4797– 4808, 2012.
- [27] S. S. Mustafa, «Kirkuk municipal waste to electrical energy,» *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 44, nº 0142-0615, p. 506–513, 2012.
- [28] W. Tsai y e. al, «An overview of renewable energy utilization from municipal solid waste (MSW) incineration in Taiwan,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, nº 1364-0321, p. 491–502, 2004.
- [29] Wat Ingenieurgesellschaft mbH, «Manual Planta de tratamiento de residuos Magic Garden,» Elaborada en el marco del proyecto RIO-B perteneciente al programa URB-AL (Proyecto núm. R6-B3-03), Mainz, 2005.
- [30] CYDEP LTDA, «Consultoria para definir la estructuración de un proyecto de generación de energía a partir de los residuos sólidos y coordinar la vinculación de dicho proyecto a la solución energética de la isla de San Andrés,» Consultoria y Dirección de Proyectos-CYDEP LTDA, Bogotá, 2008.
- [31] Á. Restrepo y E. Bazzo, «Co-firing: An exergoenvironmental analysis applied to power plants modified for burning coal and rice straw,» *Renewable Energy*, vol. 91, pp. 107-119, 2016.
- [32] Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos-UAESP, «Caracterización de los residuos sólidos residenciales en la ciudad de Bogotá DC 2011,» Alcaldía Mayor de Bogotá DC- Hábitat, Bogotá, 2011.
- [33] J. P. G. Jimenez y Y. A. P. Realpe, «Retos de la Administración Distrital en la recolección y disposición de residuos sólidos,» *Econografos Universidad Nacional de Colombia*, vol. 63, nº 012815, p. 38, 2014.
- [34] Y. Camargo y A. Vélez, «Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios,» de // *Simpósio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, Santa Marta, Colombia, 2009.
- [35] Secretaria de planeación municipal de Risaralda, «Plan de Desarrollo de Pereira,» Alcaldía de Pereira, 12 2008. [En línea]. Available: http://planeacion.risaralda.gov.co/Documentos/site/planeacion/documentos/plan_de_desarrollo/2008-2011. [Último acceso: 2 3 2017].

- [36] ATESA DE OCCIDENTE S.A E.S.P, «Informe de caracterización de residuos a disponer en el relleno sanitario La Glorita de la ciudad de Pereira,» Pereira, Colombia, 2015.
- [37] X. E. Castells, Tratamiento y valorización energética de residuos, Madrid: ISBN: 978-84-9969-141-1, 2012.
- [38] W. R. Niessen, Combustion and incineration processes, New York: Marcel Dekker Inc, 2002.
- [39] T. M. Letcher y D. A. Vallero, Waste: A Handbook for Management, Burlington MA, USA: Academic Press, 2011.
- [40] EUROPEAN COMMISSION, Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, Integrated Pollution Prevention and Control, 2006.
- [41] L. Meraz y e. al, «A thermochemical concept-based equation to estimate waste combustion enthalpy from elemental composition,» *Fuel*, vol. 82, nº 0016-2361/03/\$, p. 1499–1507, 2003.
- [42] L. Branchini, Advanced Waste to Energy cycles, Bologna, Italy: Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, 2012.
- [43] M. Bianchi y e. al, «Advanced waste-to-energy steam cycles,» *Energy Procedia*, vol. 45, nº 1876-6102, p. 1205 – 1214, 2014.
- [44] M. Bianchi, L. Branchini y A. d. Pascale, «Combining waste-to-energy steam cycle with gas turbine units,» *Applied Energy*, vol. 130, nº 0306-2619, pp. 764-733, 2014.
- [45] S. Kaushik y e. al, «Energy and exergy analyses of thermal power plants: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, nº doi:10.1016/j.rser.2010.12.007, p. 1857–1872, 2011.
- [46] J. Souza y L. Schaeffer, «Sistema de Compresión de Biogás y Biometano,» *Información Tecnológica*, vol. 24, nº doi: 10.4067/S0718-07642013000600002, pp. 3-8, 2013.
- [47] F. Lombardi y e. al, «Waste incineration in rotary kilns: a new simulation combustion tool to support design and technical change.,» *Waste Management & Research*, vol. 0, nº DOI: 10.1177/0734242X13484187, pp. 1-12, 2013.
- [48] E. Açıkkalp y e. al, «Advanced exergy analysis of an electricity-generating facility using natural gas,» *Energy Conversion and Management*, vol. 82, nº 0196-8904, p. 146–153, 2014.
- [49] M. Santos, A. v. Elk y C. Romanel, «A correction in the CDM methodological tool for estimating methane emissions from solid waste disposal sites,» *Journal of Environmental Management*, vol. 164, nº 0301-4797, pp. 151-160, 2015.

- [50] R. V. Karanjekar y e. al, «Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: The CLEEN model,» *Waste Management*, vol. 46, nº 0956-053X, pp. 389-398, 2015.
- [51] M. I. Mandujano, A. Felix y A. M. Martinez, BIOGAS, energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos, Cuernavaca Mexico: OLADE, serie publicaciones especiales, 1981.
- [52] E. U. Martínez y J. P. R. Miranda, «Aplicación de las metodologías EPA, mexicano e IPCC para la estimación de biogás, caso de estudio relleno sanitario Doña Juana, Bogotá - Colombia,» *Universidad y salud*, vol. 18, nº 18, pp. 338-344, 2016.
- [53] M. C. Hernández, Tesis doctoral: Optimización del diseño de vertederos de residuos sólidos basada en modelización, Cantabria-España: Universidad de Cantabria- Departamento de matemática aplicada y ciencias de la computación, 2012.
- [54] Environment Agency, Guidance on the management of landfill gas, Rio House, Waterside Drive, Aztec West Almondsbury, Bristol BS32 4UD: Scottish Enviroment Protection Agency-SEPA, 2004.
- [55] R. Broun y M. Sattler, «A comparison of greenhouse gas emissions and potential electricity recovery from conventional and bioreactor landfills,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, nº 0959-6526, pp. 2664-2673, 2016.
- [56] J. Bogner y e. al, «Chapter 10. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC,» de *Waste Management, In Climate Change 2007: Mitigation.*, United Kingdom and New York, Cambridge University Press, 2007, pp. 587-613.
- [57] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE- IPCC, «2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories,» NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES PROGRAMME, Washington D.C., United States of America, 2006.
- [58] A. Alexander y e. al, «Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide,» Environmental Protection Agency-EPA, Washington DC, 2006.
- [59] M. Zamorano y e. al, «Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, nº 1364-0321, p. 909–922, 2007.
- [60] Golder Associates, «GasSim 2.5,» Golder Associates, February 2012. [En línea]. Available: <http://www.gassim.co.uk/>. [Último acceso: 7 March 2017].
- [61] S. Samayoa, Guía implementación de sistemas de biodigestion en ecoempresas, 1 ed., Comunica, Ed., Boulevard Suyapa, Colonia Florencia Norte.: SNV, 2012.
- [62] S. Martín González, «Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: Análisis de variables y modelización,» Universidad de Oviedo, Gijón, 1997.

- [63] W. H., «Energy recovery from landfill gas in Denmark and worldwide,» In Międzynarodowego Seminarium-International Workshop for Utilization of Landfill Gas for Energy Production, 2001. [En línea]. Available: http://www.lei.lt/_img/_up/File/atvir/Opet/pdf/Willumsen.pdf. [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [64] SCS Engineers, «Relleno Sanitarios Doña Juana Bogotá, Colombia,» Metane to Markets File No. 02205510.00, Reston Virginia, 2007.
- [65] S. López, «Evaluación económica asociada al traslado de los residuos sólidos de la ciudad de Pereira al relleno sanitario La Esmeralda de la ciudad de Manizales,» *Scientia et Technica*, vol. 53, pp. 1689-1699, 2013.
- [66] K. A. Kalyani y K. K. Pandey, «Waste to energy status in India: A short review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, nº 1364-0321, pp. 113-120, 2014.
- [67] A. F. Panesso y e. al, «Análisis Del Biogás Captado En Un Relleno Sanitario Como Combustible Primario Para La Generación De Energía Eléctrica,» *Scientia et Technica*, vol. 47, nº ISSN 0122-1701, pp. 23-28, 2011.
- [68] G. Barigozzi, A. Perdichizzi y S. Ravelli, «Performance prediction and optimization of a waste-to-energy cogeneration plant with combined wet and dry cooling system,» *Applied Energy*, vol. 115, nº <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.024>, pp. 65-74, 2014.

ANEXO 1. Adaptación planta WtE San Andrés Colombia. (Autoría propia)



ANEXO 2. Código en EES para la simulación de la planta *WtE* de San Andrés.

```
"W_turb=1400 [kw]"
"eta_gen=0.98"
"eta_trafo=0.97"
"eta_mec=0.94"
"eta_aux=0.96"
eta_bom=0.89
eta_turb=0.85
"eta_cald=0.85"
"C.E.V=7.5 [kg/kw-h]"
"DELTAT_f.e=15 [°C]"
"DELTAT_min=10 [°C]"
"DELTAP_BT=30 [Kpa]"
"DELTAT_KT=20 [°C]"
T_0=25 [°C]
x=0.1
y=0.9

"Cálculo de la potencia de consumo y el flujo másico tentativo"
"W_max=m_tent*W_CONS/(eta_gen*eta_trafo*eta_mec*eta_aux)"
"m_tent=C.E.V*W_CONS*1/3600 [kg/s]"

"estado 1- entrada turbina"
P[1]=1135 [kPa]
T[1]=185.5 [°C]
"T[1]=temperature(Water,P=P[1],h=h[1])"
h[1]=enthalpy(Water,P=P[1],T=T[1])
s[1]=entropy(Water,P=P[1],T=T[1])
v[1]=volume(Water,P=P[1],T=T[1])
x[1]=quality(Water,P=P[1],T=T[1])

"Estado 2- salida turbina"

P[2]=10 [kPa]
x[2]=0.9
T[2]=temperature(Water,P=P[2],x=0.9)
h[2]=enthalpy(Water,T=T[2],x=0.9)
s[2]=entropy(Water,T=T[2],x=0.9)
v[2]=volume(Water,T=T[2],x=0.9)

"Estado 3- salida cámara mezclado abierta"
P[3]=P[2]
T[3]=T[2]
x[3]=x[2]
h[3]=h[2]
s[3]=s[2]
```

$v[3]=v[2]$
 $h[3]=\text{enthalpy}(\text{Water}, P=P[3], T=T[3])$
 $s[3]=\text{entropy}(\text{Water}, P=P[3], T=T[3])$
 $v[3]=\text{volume}(\text{Water}, P=P[3], T=T[3])$

"Estado 4- salida condensador"

$T[4]=T[3]$
 $T[4]=\text{temperature}(\text{Water}, P=P[4], x=0)$
 $P[4]=P[3]$
 $x[4]=0$
 $P[4]=\text{pressure}(\text{Water}, T=T[4], h=h[4])$
 $h[4]=\text{enthalpy}(\text{Water}, T=T[4], x=0)$
 $s[4]=\text{entropy}(\text{Water}, T=T[4], x=0)$
 $v[4]=\text{volume}(\text{Water}, T=T[4], x=0)$

"Estado 5-salida del sistema de bombeo de primera etapa"

$T[5]=T[4]$
 $P[5]=P[4]+120$
 $h[5]=\text{enthalpy}(\text{Water}, T=T[5], P=P[5])$
 $s[5]=\text{entropy}(\text{Water}, T=T[5], P=P[5])$
 $v[5]=\text{volume}(\text{Water}, T=T[5], P=P[5])$

"Estado 6-salida del eyector"

$P[6]=P[5]+65[\text{kPa}]$
 $T[6]=\text{temperature}(\text{Water}, P=P[6], h=h[6])$
 $h[6]=\text{enthalpy}(\text{Water}, T=T[6], h=h[6])$
 $s[6]=\text{entropy}(\text{Water}, P=P[6], h=h[6])$
 $v[6]=\text{volume}(\text{Water}, P=P[6], h=h[6])$

"Estado 7-salida del deaireador"

$P[7]=P[6]$
 $T[7]=T[8]$
 $h[7]=\text{enthalpy}(\text{Water}, P=P[7], T=T[7])$
 $s[7]=\text{entropy}(\text{Water}, P=P[7], T=T[7])$
 $v[7]=\text{volume}(\text{Water}, P=P[7], T=T[7])$

"Estado 8"

$T[8]=T[7]$
 $P[8]=P[1]$
 $h[8]=659.86 [\text{kJ/kg}]$
 $h[8]=h[10]-(Q_{\text{in}}/m_{\text{tot}})$
 $P[8]=\text{pressure}(\text{Water}, T=T[8], h=h[8])$
 $T[8]=\text{temperature}(\text{Water}, P=P[8], h=h[8])$
 $s[8]=\text{entropy}(\text{Water}, P=P[8], h=h[8])$
 $v[8]=\text{volume}(\text{Water}, P=P[8], h=h[8])$

"Estado 9"

$P[9]=P[8]$
 $T[9]=T[8]$

s[9]=entropy(Water,P=P[9],T=T[9])
v[9]=volume(Water,P=P[9],T=T[9])
h[9]=enthalpy(Water,P=P[9],T=T[9])

"Estado 10"

P[10]=P[1]
"T[10]=T[1]"
T[10]=temperature(Water,P=P[10],h=h[10])
"h[10]=enthalpy(Water,P=T[10],h=h[10])"
s[10]=entropy(Water,P=P[10],h=h[10])
v[10]=volume(Water,P=P[10],h=h[10])

"Estado 11"

P[11]=P[1]
T[11]=T[1]
h[11]=enthalpy(Water,P=P[11],T=T[11])
s[11]=entropy(Water,P=P[11],T=T[11])
v[11]=volume(Water,P=P[11],T=T[11])

"Estado 12"

P[12]=P[6]+50 [kPa]
h[12]=h[11]
T[12]=temperature(Water,h=h[12],P=P[12])
s[12]=entropy(Water,h=h[12],P=P[12])
v[12]=volume(Water,h=h[12],P=P[12])

"Estado 13"

P[13]= P[6]
T[13]= T[18]
h[13]=enthalpy(Water,P=P[13],T=T[13])
s[13]=entropy(Water,P=P[13],T=T[13])
v[13]=volume(Water,P=P[13],T=T[13])

"Estado 14"

P[14]=400 [kPa]
T[14]=144 [°C]
h[14]=enthalpy(Water,T=T[14],P=P[14])
s[14]=entropy(Water,T=T[14],P=P[14])
v[14]=volume(Water,T=T[14],P=P[14])

"Estado 15-sistema bypass"

P[15]=P[1]
T[15]=T[1]
h[15]=enthalpy(Water,T=T[15],P=P[15])
s[15]=entropy(Water,T=T[15],P=P[15])
v[15]=volume(Water,T=T[15],P=P[15])

"Estado 16-sistema bypass"

$$P[16]=P[2]$$

$$h[16]=h[15]$$

$$T[16]=\text{temperature}(\text{Water}, h=h[16], P=P[16])$$

$$s[16]=\text{entropy}(\text{Water}, h=h[16], P=P[16])$$

$$v[16]=\text{volume}(\text{Water}, h=h[16], P=P[16])$$

"Estado 18-estado de referencia, condiciones ambiente"

$$P[18]=101.325 \text{ [kPa]} \text{ "ciudad a nivel del mar"}$$

$$T[18]=T_0$$

$$h[18]=\text{enthalpy}(\text{Water}, T=T[18], P=P[18])$$

$$s[18]=\text{entropy}(\text{Water}, T=T[18], P=P[18])$$

$$v[18]=\text{volume}(\text{Water}, T=T[18], P=P[18])$$

"análisis sistema de enfriamiento por torres de enfriamiento"

"Estado 19-sistema de enfriamiento torres-profundizar en este punto"

$$P[19]=300 \text{ [kPa]} \text{ "asumo"}$$

$$T[19]=T[18]$$

$$h[19]=\text{enthalpy}(\text{Water}, T=T[19], P=P[19])$$

$$s[19]=\text{entropy}(\text{Water}, T=T[19], P=P[19])$$

$$v[19]=\text{volume}(\text{Water}, T=T[19], P=P[19])$$

"Primera ley para la turbina"

$$W_{\text{turb}}=m_{\text{turb}}*(h[1]-x*h[14]-y*h[2])$$

$$W_{\text{Bturb}}=W_{\text{turb}}/\eta_{\text{turb}}$$

"Primera ley para las bombas"

$$W_{\text{BB1}}=m_4*v[5]*(P[5]-P[4])$$

$$W_{\text{RB1}}=m_4*(h[5]-h[4])$$

$$W_{\text{RB1}}=W_{\text{BB1}}/\eta_{\text{bom}}$$

$$W_{\text{BB2}}=m_7*v[8]*(P[8]-P[7])$$

$$W_{\text{BB2}}=m_7*(h[8]-h[7])$$

$$W_{\text{RB2}}=W_{\text{BB2}}/\eta_{\text{bom}}$$

"POTENCIA NETA"

$$W_{\text{NET}}=W_{\text{turb}}-(W_{\text{RB1}}+W_{\text{RB2}})$$

"Primera ley para el agua del condensador"

$$Q_{\text{in}}-Q_{\text{out}}=W_{\text{NET}}$$

$$Q_{\text{out}}=m_3*(h[3]-h[4])$$

"Primera ley para la camara de mezclado-eyector"

$$h[6]*m_6=m_{12}*h[12]+m_5*h[5]$$

"Primera ley para la camara de mezclado-Bypass-salida turbina"

$$h[3]*m_3=m_{16}*h[16]+m_2*h[2]$$

"Primera ley para el agua de la caldera"

$$Q_{in} = \eta_{cald} \cdot Q_{tot}$$

$$Q_{in} = m_{tot} \cdot (h[10] - h[9])$$

$$Q_{dot_{in}} = m_{tot} \cdot (h[10] - h[8])$$

"Primera ley para el colector de vapor"

$$m_{tot} \cdot h[10] = m_{11} \cdot h[11] + m_1 \cdot h[1]$$

"Cálculo de la eficiencia del ciclo"

$$\eta_c = W_{NET} / Q_{in}$$

"Balance de masa"

$$m_{tot} = 14 \cdot (1000 / 3600)$$

$$m_{turb} = 0.90907 \cdot m_{tot}$$

$$m_1 = m_{turb}$$

$$m_2 = m_{turb} \cdot y$$

$$m_3 = m_{turb} \cdot y$$

$$m_4 = m_{turb} \cdot y$$

$$m_5 = m_{turb} \cdot y$$

$$m_{11} = 0.1 \cdot m_1$$

$$m_{12} = m_{11}$$

$$m_6 = m_5 + m_{12}$$

$$m_7 = m_{tot}$$

$$m_7 = m_8$$

$$m_{14} = m_{turb} \cdot x$$

"=====

"Análisis horno de incineración"

$$m_{RSU} = 0.925925 \text{ [kg/s]} \text{ "dividido dos porque son dos hornos que en total procesan 80 ton/dia"}$$

$$Q_{tot} = m_{RSU} \cdot PCI_{RSUprom}$$

"Cálculo del poder calorífico"

$$C_c = 46.61 \quad "[\%]"$$

$$H_c = 5.86 \quad "[\%]"$$

$$S_c = 0.16 \quad "[\%]"$$

$$O_c = 27.48 \quad "[\%]"$$

$$N_c = 1.20 \quad "[\%]"$$

$$H_2O_c = 25.16 \quad "[\%]"$$

$$Ash_c = 6.09 \quad "[\%]"$$

$$PCS_{RSUprom} = (PCSc_1 + PCSc_2 + PCSc_3 + PCSc_4) / 4$$

PROMEDIO"

"[PCS MSW] kJ/kg

$$PCI_{RSUprom} = (PCIc_1 + PCIc_2 + PCIc_3 + PCIc_4) / 4$$

PROMEDIO"

"[PCI MSW] kJ/kg

$PCSc_1 = ((1 - H_2O_c / 100) * (-0.3578 * C_c - 1.1357 * H_c + 0.0845 * O_c - 0.0594 * N_c - 0.1119 * S_c)) * (-1000)$ "[PCS MSW] según Lloyd y Davenport"

$PCSc_2 = (1 - H_2O_c / 100) * (-0.3708 * C_c - 1.1124 * H_c + 0.1391 * O_c - 0.3178 * N_c - 0.1391 * S_c) * (-1000)$
 "[PCS MSW] según Laura Meratz et al, 2003 [kJ/kg]"

$PCSc_3 = ((1 - H_2O_c / 100) * (-0.3517 * C_c - 1.1625 * H_c + 0.1109 * O_c - 0.0628 * N_c - 0.1109 * S_c)) * (-1000)$ "[PCS MSW] según Boie [kJ/kg]"

$PCSc_4 = (1 - H_2O_c / 100) * (-0.3279 * C_c - 1.533 * H_c + 0.1668 * O_c + 0.0242 * N_c - 0.0928 * S_c) * (-1000)$
 "[PCS MSW] según Wilson [kJ/kg]"

$PClc_1 = (PCSc_1 - 52.397 * H_c * 4.184)$
 [kJ/kg]"

"[PCI MSW] segun Lloyd y Davenport

$PClc_2 = (PCSc_2 - 52.397 * H_c * 4.184)$
 al, 2003 [kJ/kg]"

"[PCI MSW] segun Laura Meratz et

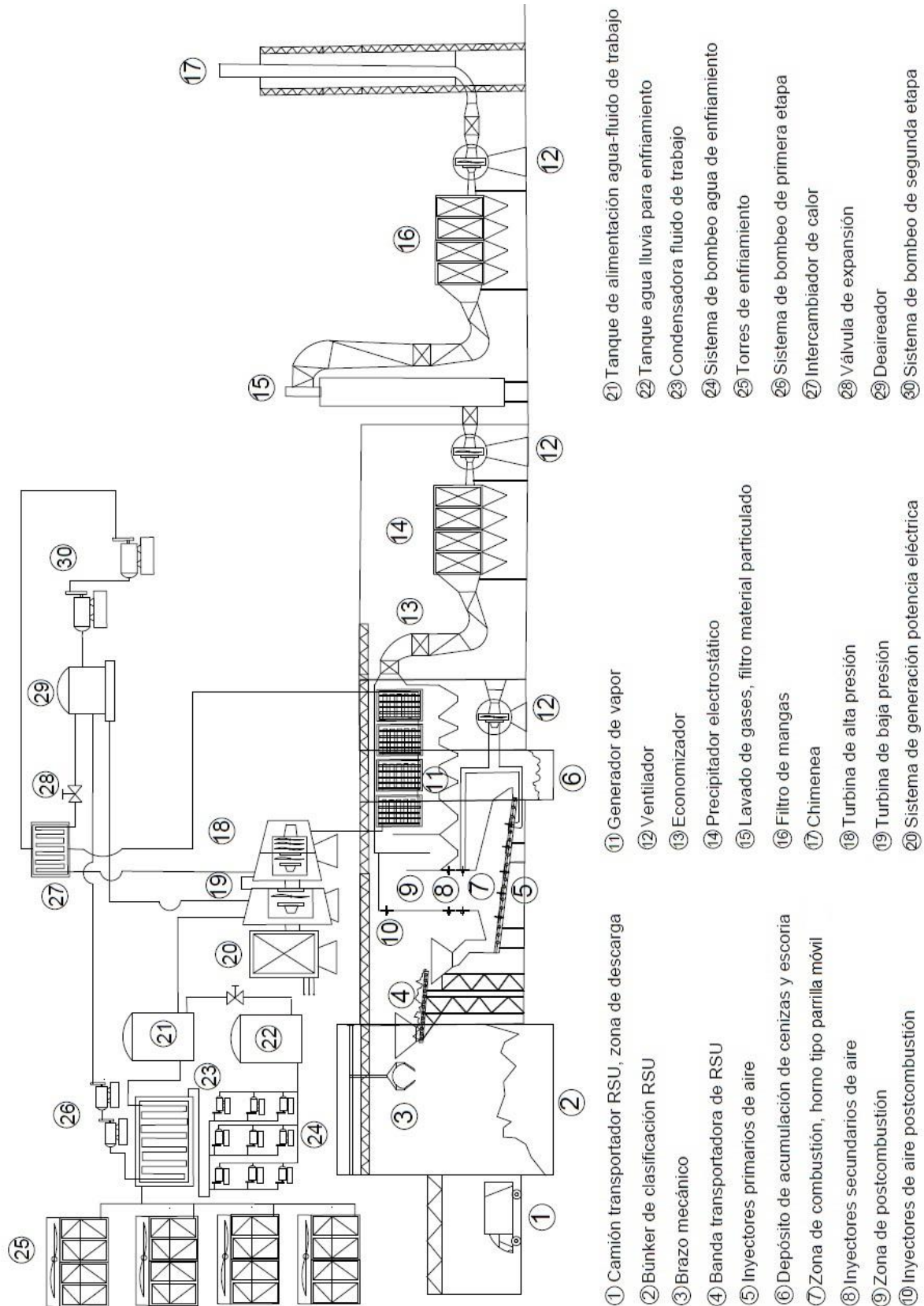
$PClc_3 = (PCSc_3 - 52.397 * H_c * 4.184)$

"[PCI MSW] según Boie [kJ/kg]"

$PClc_4 = (PCSc_4 - 52.397 * H_c * 4.184)$

"[PCI MSW] según Wilson [kJ/kg]"

ANEXO 3. Propuesta de planta WtE Bogotá Colombia. (Autoría propia)



ANEXO 4. Código en EES para la simulación de la planta *WtE* de Bogotá.

"Las condiciones de operación de la planta son:"

eta_bomb=0.89
eta_turb=0.89
eta_cald=0.85
T_0=18 [°C]
m_dot=40 [kg/s]

"estado 1- salida condensador"

P[1]=10 [kPa]
T[1]=45 [°C]
h[1]=enthalpy(Water,P=P[1],T=T[1])
s[1]=entropy(Water,P=P[1],T=T[1])
v[1]=volume(Water,P=P[1],T=T[1])

"Estado 2- salida sistema de bombeo primera etapa"

P[2]=300 [kPa]
h[2]=h[1]+W_dot_bomb1s
"h[2]=192 [kJ/kg]"
T[2]=temperature(Water,P=P[2],h=h[2])
s[2]=entropy(Water,P=P[2],h=h[2])
v[2]=volume(Water,P=P[2],h=h[2])

"Estado 3- salida deaerador"

P[3]=300 [kPa]
x[3]=0
T[3]=temperature(Water,P=P[3],x=x[3])
h[3]=enthalpy(Water,P=P[3],x=x[3])
s[3]=entropy(Water,P=P[3],x=x[3])
v[3]=volume(Water,P=P[3],x=x[3])

"Estado 4- salida sistema de bombeo de segunda etapa"

P[4]=2000 [kPa]
h[4]=h[3]+W_dot_bomb2s
T[4]=temperature(Water,P=P[4],h=h[4])
s[4]=entropy(Water,P=P[4],h=h[4])
v[4]=volume(Water,P=P[4],h=h[4])

"Estado 5-salida del intercambiador de calor cerrado"

P[5]=P[4]
T[5]=T[6]

"T[5]=temperature(Water,P=P[5],h=h[5])"
h[5]=enthalpy(Water,P=P[5],T=T[5])
s[5]=entropy(Water,P=P[5],T=T[5])
v[5]=volume(Water,P=P[5],T=T[5])

"Estado 6-entrada valvula de expansion"
P[6]=800 [kPa]
x[6]=0
h[6]=enthalpy(Water,P=P[6],x=x[6])
T[6]=temperature(Water,P=P[6],x=x[6])
s[6]=entropy(Water,P=P[6],x=x[6])
v[6]=volume(Water,P=P[6],x=x[6])

"Estado 7-salida valvula de expansion"
P[7]=P[2]
h[7]=h[6]
T[7]=temperature(Water,P=P[7],h=h[7])
s[7]=entropy(Water,P=P[7],h=h[7])
v[7]=volume(Water,P=P[7],h=h[7])

"Estado 8-entrada generador de vapor"
P[8]=P[5]
T[8]=T[5]
h[8]=h[5]
s[8]=s[5]
v[8]=v[5]

"Estado 9 salida generador de vapor"
P[9]=P[4]
T[9]=400 [°C]
s[9]=entropy(Water,P=P[9],T=T[9])
v[9]=volume(Water,P=P[9],T=T[9])
h[9]=enthalpy(Water,P=P[9],T=T[9])

"Estado 10 primera extraccion turbina"
P[10]=800 [kPa]
s[10]=s[9]
T[10]=temperature(Water,P=P[10],s=s[10])
h_s[10]=enthalpy(Water,P=P[10],s=s[10])
v[10]=volume(Water,P=P[10],T=T[10])
h[10]=h_s[10]

"Estado 11 segunda extraccion turbina"
P[11]=300 [kPa]
s[11]=s[9]
h_s[11]=enthalpy(Water,P=P[11],s=s[11])
T[11]=temperature(Water,P=P[11],s=s[11])
v[11]=volume(Water,P=P[11],T=T[11])
h[11]=h_s[11]

"Estado 12 salida turbina"

$P[12]=10$ [kPa]

$s[12]=s[9]$

$T[12]=\text{temperature}(\text{Water}, P=P[12], s=s[12])$

$h_s[12]=\text{enthalpy}(\text{Water}, P=P[12], s=s[12])$

$x[12]=\text{quality}(\text{Water}, P=P[12], s=s[12])$

$v[12]=\text{volume}(\text{Water}, P=P[12], x=x[12])$

$h[12]=h_s[12]$

"Primera ley para la turbina"

$W_{\text{dot_turbs}}=m_{\text{dot}}*(h[9]-y*h_s[10]-z*h_s[11]-(1-y-z)*h_s[12])$

$W_{\text{dot_turbR}}=W_{\text{dot_turbs}}*\eta_{\text{turb}}$

"Primera ley para las bombas"

$W_{\text{dot_bomb1s}}=(1-y-z)*m_{\text{dot}}*v[1]*(P[2]-P[1])$

$W_{\text{dot_bomb2s}}=m_{\text{dot}}*v[3]*(P[4]-P[3])$

$W_{\text{dot_bomb1R}}=W_{\text{dot_bomb1s}}/\eta_{\text{bomb}}$

$W_{\text{dot_bomb2R}}=W_{\text{dot_bomb2s}}/\eta_{\text{bomb}}$

"POTENCIA NETA"

$W_{\text{dot_NETs}}=W_{\text{dot_turbs}}-(W_{\text{dot_bomb1s}}+W_{\text{dot_bomb2s}})$

$W_{\text{dot_NETR}}=W_{\text{dot_turbR}}-(W_{\text{dot_bomb1R}}+W_{\text{dot_bomb2R}})$

"Primera ley para el agua del condensador"

$Q_{\text{dot_out}}=(1-y-z)*m_{\text{dot}}*(h_s[12]-h[1])$

"Primera ley para el agua de la caldera"

$Q_{\text{dot_in}}=\eta_{\text{cald}}*Q_{\text{dot_tot}}$

$Q_{\text{dot_in}}=m_{\text{dot}}*(h[9]-h[5])$

"Cálculo de la eficiencia del ciclo"

$\eta_c=W_{\text{dot_NETR}}/Q_{\text{dot_in}}$

"Balance de masa"

$y=(h[5]-h[4])/(h_s[10]-h[6])$

$z=((h[3]-h[2])-y*(h[7]-h[2]))/(h_s[11]-h[2])$

"=====

"Análisis horno de incineración"

" $m_{\text{dot_RSU}}=0.0925925$ [kg/s]" "en total procesa 800 ton/día"

$Q_{\text{dot_tot}}=m_{\text{dot_RSU}}*PCI_{\text{RSUprom}}$

$PCI_{\text{RSUprom}}=23275$

"Cálculo del poder calorífico"

"Cc = 45.01 [%]"

"Hc = 5.94 [%]"

"Sc = 0.29 [%]"

"Oc = 34.41 [%]"

"Nc = 1.75 [%]"

"H2Oc= 44.5 [%]"

"Ashc= 5.27 [%]"

"PCS_RSUprom= (PCSc_1+PCSc_2+PCSc_3+PCSc_4)/4 [PCS MSW] kJ/kg
PROMEDIO"

"PCI_RSUprom=(PClc_1+PClc_2+PClc_3+PClc_4)/4 [PCI MSW]kJ/kg
PROMEDIO"

"PCSc_1=((1-H2Oc/100)*(-0.3578*Cc-1.1357*Hc+0.0845*Oc-0.0594*Nc-0.1119*Sc))*(-1000) [PCS MSW] segun Lloyd y Davenport"

"PCSc_2=(1-H2Oc/100)*(-0.3708*Cc-1.1124*Hc+0.1391*Oc-0.3178*Nc-0.1391*Sc))*(-1000)
[PCS MSW] segun Laura Meratz et al,2003 [kJ/kg]"

"PCSc_3=((1-H2Oc/100)*(-0.3517*Cc-1.1625*Hc+0.1109*Oc-0.0628*Nc-0.1109*Sc))*(-1000) [PCS MSW] segun Boie [kJ/kg]"

"PCSc_4=(1-H2Oc/100)*(-0.3279*Cc-1.533*Hc+0.1668*Oc+0.0242*Nc-0.0928*Sc))*(-1000)
[PCS MSW] segun Wilson [kJ/kg]"

"PClc_1=(PCSc_1-52.397*Hc*4.184) [PCI MSW] según Lloyd y Davenport
[kJ/kg]"

"PClc_2=(PCSc_2-52.397*Hc*4.184) [PCI MSW] según Laura Meratz et al,2003
[kJ/kg]"

"PClc_3=(PCSc_3-52.397*Hc*4.184) [PCI MSW] segun Boie [kJ/kg]"

"PClc_4=(PCSc_4-52.397*Hc*4.184) [PCI MSW] segun Wilson [kJ/kg]"

ANEXO 5. Resultados históricos medición biogás la glorita vaso 6.

	CH4	CO2	O2	BALANCE%	CO	H2S (PMM)
FECHA	15/10/2008					
Mínimo	4,50	3,20	0,00	0,00	0,00	1,00
Máximo	56,50	44,20	9,70	82,60	10,00	159,00
Promedio	34,74	26,73	4,38	34,15	3,62	42,77
FECHA	30/12/2008					
Mínimo	2,00	1,20	0,00	0,10	0,00	0,00
Máximo	56,40	43,70	10,90	86,30	7,00	163,00
Promedio	34,90	27,06	4,91	28,13	2,90	57,00
FECHA	27/03/2009					
Mínimo	5,60	3,80	0,20	1,40	3,00	0,00
Máximo	56,30	44,10	19,30	71,30	7,00	142,00
Promedio	32,86	27,64	6,79	32,71	3,88	22,00
FECHA	16/09/2009					
Mínimo	5,00	4,20	0,00	0,10	0,00	0,00
Máximo	55,00	46,70	17,50	73,30	3,00	162,00
Promedio	36,78	30,83	4,73	27,66	1,10	70,10
FECHA	26/10/2009					
Mínimo	0,40	0,50	0,00	0,10	0,00	0,00
Máximo	54,50	47,40	19,50	79,60	3,00	158,00
Promedio	32,70	27,80	6,60	33,00	1,50	49,10
FECHA	22/12/2009					
Mínimo	1,80	1,20	0,00	0,50	0,00	0,00
Máximo	57,10	44,00	18,90	78,10	6,00	168,00
Promedio	40,09	31,16	3,31	25,44	2,55	57,18
FECHA	25/03/2010					
Mínimo	4,00	3,20	0,00	0,80	0,00	9,00
Máximo	56,00	43,30	13,70	83,10	0,30	592,00
Promedio	35,98	28,17	4,53	31,33	0,13	105,17
FECHA	22/06/2010					
Mínimo	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
Máximo	57,00	44,00	18,00	82,00	129,00	136,00
Promedio	31,53	24,53	7,59	36,53	33,00	35,67
FECHA	20/09/2010					
Mínimo	0,00	0,30	0,00	1,90	0,00	0,00
Máximo	54,10	54,00	17,20	82,50	178,00	136,00
Promedio	29,13	28,47	7,85	34,57	55,45	39,70
FECHA	01/12/2010					

Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,10	3,00	0,00
Máximo	56,60	66,50	17,20	92,00	2035,00	301,00
Promedio	26,07	26,98	6,03	43,25	395,05	97,00
FECHA	29/03/2011					
Mínimo	0,30	0,20	0,40	1,80	0,00	0,00
Máximo	56,80	42,00	19,40	80,10	121,00	27,00
Promedio	29,38	22,10	8,11	39,78	34,00	10,08
FECHA	30/06/2011					
Mínimo	0,20	0,10	0,40	28,59	21,85	38,42
Máximo	57,60	42,50	18,90	0,16	9,00	7,00
Promedio	37,38	29,52	5,68	80,80	31,00	86,00
FECHA	30/09/2011					
Mínimo	0,00	0,00	0,10	0,50	0,00	0,00
Máximo	54,40	49,10	36,10	80,90	340,00	175,00
Promedio	29,53	25,84	10,80	34,18	73,81	35,33
FECHA	30/12/2011					
Mínimo	0,00	0,00	0,00	2,20	0,00	0,00
Máximo	55,80	52,10	19,40	81,60	332,00	546,00
Promedio	18,50	15,40	12,20	53,90	59,40	38,80
	30/06/2012					
Mínimo	0,00	0,00	0,02	2,20	0,00	0,00
Máximo	55,80	52,10	19,50	81,60	546,00	332,00
Promedio	18,86	15,86	12,07	53,21	39,70	60,70
FECHA	30/09/2012					
Mínimo	0,00	0,00	18,80	80,30	>>>>	>>>>
Máximo	0,00	0,30	19,50	80,90	>>>>	>>>>
Promedio	15,67	12,99	13,78	57,60	>>>>	>>>>
FECHA	27/12/2012					
Mínimo	0,00	0,10	1,10	0,00	>>>>	>>>>
Máximo	55,00	43,20	19,60	84,70	>>>>	>>>>
Promedio	23,50	19,50	10,00	46,90	>>>>	>>>>
FECHA	25/03/2013					
Mínimo	0,00	0,10	0,80	0,00	>>>>	>>>>
Máximo	53,30	45,90	20,50	86,70	>>>>	>>>>
Promedio	18,51	15,13	12,70	51,65	>>>>	>>>>
FECHA	29/07/2013					
Mínimo	0,00	0,10	0,80	0,00	>>>>	>>>>
Máximo	53,30	45,90	20,50	86,70	>>>>	>>>>
Promedio	18,51	15,13	12,70	51,65	>>>>	>>>>
FECHA	26/09/2013					
Mínimo	0,00	0,10	8,10	0,00	>>>>	>>>>

Máximo	48,10	41,50	18,70	84,50	>>>>	>>>>
Promedio	19,81	16,78	14,81	48,30	>>>>	>>>>
FECHA	20/12/2013					
Mínimo	0,00	0,10	0,30	0,00	>>>>	>>>>
Máximo	54,70	44,60	18,90	83,60	>>>>	>>>>
Promedio	19,57	16,13	12,20	52,09	>>>>	>>>>
FECHA	26/04/2014					
Mínimo	0,00	0,10	3,90	0,00	>>>>	>>>>
Máximo	52,60	44,00	19,50	85,00	>>>>	>>>>
Promedio	11,64	9,88	15,60	59,86	>>>>	>>>>
FECHA	20/07/2014					
Mínimo	0,00	0,00	8,00	0,00	>>>>	>>>>
Máximo	47,00	41,00	12,00	83,00	>>>>	>>>>
Promedio	21,33	21,60	10,25	14,67	>>>>	>>>>
FECHA	04/10/2014					
Mínimo	0,00	0,00	7,00	2,10	>>>>	>>>>
Máximo	50,00	25,00	18,00	90,10	>>>>	>>>>
Promedio	20,60	11,00	12,60	30,10	>>>>	>>>>
FECHA	28/12/2014					
Mínimo	0,00	0,00	1,90	1,70	>>>>	>>>>
Máximo	49,80	41,30	20,00	87,90	>>>>	>>>>
Promedio	12,20	11,20	13,40	62,60	>>>>	>>>>
FECHA	18/03/2015					
Mínimo	0,00	0,10	1,80	3,30	>>>>	>>>>
Máximo	46,00	41,40	18,90	84,00	>>>>	>>>>
Promedio	16,50	15,73	11,80	55,10	>>>>	>>>>
FECHA	18/06/2015					
Mínimo	0,00	0,00	1,80	21,50	0,00	0,00
Máximo	41,10	35,60	19,10	81,20	487,00	146,00
Promedio	14,80	15,30	11,40	58,50	38,80	27,50
FECHA	18/09/2015					
Mínimo	0,00	0,00	14,40	72,20	0,00	0,00
Máximo	6,30	3,90	19,80	83,00	487,00	146,00
Promedio	0,62	0,78	17,90	80,70	39,84	28,30
FECHA	18/12/2015					
Mínimo	0,00	0,00	2,30	32,40	0,00	0,00
Máximo	34,70	32,20	19,20	89,90	75,00	103,00
Promedio	9,30	10,00	13,00	67,60	16,10	16,40
FECHA	12/03/2016					
Mínimo	0,00	0,00	4,20	26,40	1,00	0,00
Máximo	37,70	31,60	23,70	83,50	49,00	45,00

Promedio	3,90	3,00	16,80	76,20	15,70	7,00
FECHA	11/06/2016					
Mínimo	0,80	0,10	1,10	0,00	1,00	0,00
Máximo	54,30	51,00	21,00	81,60	38,00	33,00
Promedio	21,50	18,50	12,40	47,60	14,20	5,50

Promedio de medición del biogás relleno sanitario La Glorita vaso 6.

FECHA	CH4	CO2	O2	BALANCE%	CO	H2S (PMM)
15/10/2008	34,74	26,73	4,38	34,15	3,62	42,77
30/12/2008	34,90	27,06	4,91	28,13	2,90	57,00
27/03/2009	32,86	27,64	6,79	32,71	3,88	22,00
16/09/2009	36,78	30,83	4,73	27,66	1,10	70,10
26/10/2009	32,70	27,80	6,60	33,00	1,50	49,10
22/12/2009	40,09	31,16	3,31	25,44	2,55	57,18
25/03/2010	35,98	28,17	4,53	31,33	0,13	105,17
22/06/2010	31,53	24,53	7,59	36,53	33,00	35,67
20/09/2010	29,13	28,47	7,85	34,57	55,45	39,70
01/12/2010	26,07	26,98	6,03	43,25	395,05	97,00
29/03/2011	29,38	22,10	8,11	39,78	34,00	10,08
30/06/2011	37,38	29,52	5,68	80,80	31,00	86,00
30/09/2011	29,53	25,84	10,80	34,18	73,81	35,33
30/12/2011	18,50	15,40	12,20	53,90	59,40	38,80
30/06/2012	18,86	15,86	12,07	53,21	39,70	60,70
30/09/2012	15,67	12,99	13,78	57,60	>>>>	>>>>
27/12/2012	23,50	19,50	10,00	46,90	>>>>	>>>>
25/03/2013	18,51	15,13	12,70	51,65	>>>>	>>>>
29/07/2013	18,51	15,13	12,70	51,65	>>>>	>>>>
26/09/2013	19,81	16,78	14,81	48,30	>>>>	>>>>
20/12/2013	19,57	16,13	12,20	52,09	>>>>	>>>>
26/04/2014	11,64	9,88	15,60	59,86	>>>>	>>>>
20/07/2014	21,33	21,60	10,25	14,67	>>>>	>>>>
04/10/2014	20,60	11,00	12,60	30,10	>>>>	>>>>
28/12/2014	12,20	11,20	13,40	62,60	>>>>	>>>>
18/03/2015	16,50	15,73	11,80	55,10	>>>>	>>>>
18/06/2015	14,80	15,30	11,40	58,50	38,80	27,50
18/09/2015	0,62	0,78	17,90	80,70	39,84	28,30
18/12/2015	9,30	10,00	13,00	67,60	16,10	16,40
12/03/2016	3,90	3,00	16,80	76,20	15,70	7,00
11/06/2016	21,50	18,50	12,40	47,60	14,20	5,50

ANEXO 6. Especies generadas en el relleno sanitario La Glorita, según los resultados obtenidos del modelo *LandGEM*.

Año	Biogás · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Metano · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Dióxido de carbono · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	NMOCs · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$
1997	0,00	0,00	0,00	0,00
1998	1,06	0,57	0,49	0,02
1999	2,11	1,14	0,97	0,04
2000	3,13	1,69	1,44	0,07
2001	4,14	2,23	1,90	0,09
2002	5,13	2,77	2,36	0,11
2003	6,11	3,30	2,81	0,13
2004	7,07	3,82	3,25	0,15
2005	8,02	4,33	3,69	0,17
2006	8,96	4,84	4,12	0,19
2007	9,89	5,34	4,55	0,21
2008	10,81	5,84	4,97	0,23
2009	11,72	6,33	5,39	0,25
2010	13,12	7,09	6,04	0,28
2011	14,51	7,83	6,67	0,31
2012	15,87	8,57	7,30	0,34
2013	17,23	9,30	7,93	0,37
2014	18,58	10,03	8,54	0,39
2015	19,91	10,75	9,16	0,42
2016	21,23	11,47	9,77	0,45
2017	22,55	12,18	10,37	0,48
2018	23,86	12,89	10,98	0,51
2019	25,19	13,60	11,59	0,53
2020	26,53	14,33	12,20	0,56
2021	27,89	15,06	12,83	0,59
2022	29,27	15,80	13,46	0,62
2023	30,66	16,56	14,10	0,65

Continuación Anexo 6.

Año	Biogás · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Metano · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Dióxido de carbono · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	NMOCs · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$
2024	32,08	17,32	14,76	0,68
2025	33,52	18,10	15,42	0,71
2026	34,99	18,89	16,10	0,74
2027	36,48	19,70	16,78	0,77
2028	38,00	20,52	17,48	0,81
2029	39,55	21,36	18,19	0,84
2030	41,13	22,21	18,92	0,87
2031	42,74	23,08	19,66	0,91
2032	44,38	23,97	20,42	0,94
2033	46,06	24,87	21,19	0,98
2034	47,78	25,80	21,98	1,01
2035	45,91	24,79	21,12	0,97
2036	44,11	23,82	20,29	0,93
2037	42,38	22,88	19,49	0,90
2038	40,72	21,99	18,73	0,86
2039	39,12	21,12	18,00	0,83
2040	37,59	20,30	17,29	0,80
2041	36,11	19,50	16,61	0,77
2042	34,70	18,74	15,96	0,74
2043	33,34	18,00	15,33	0,71
2044	32,03	17,30	14,73	0,68
2045	30,77	16,62	14,16	0,65
2046	29,57	15,97	13,60	0,63
2047	28,41	15,34	13,07	0,60
2048	27,29	14,74	12,55	0,58
2049	26,22	14,16	12,06	0,56
2050	25,19	13,61	11,59	0,53
2051	24,21	13,07	11,14	0,51
2052	23,26	12,56	10,70	0,49

Continuación Anexo 6.

Año	Biogás · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Metano · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Dióxido de carbono · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	NMOCs · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$
2053	22,35	12,07	10,28	0,47
2054	21,47	11,59	9,88	0,45
2055	20,63	11,14	9,49	0,44
2056	19,82	10,70	9,12	0,42
2057	19,04	10,28	8,76	0,40
2058	18,30	9,88	8,42	0,39
2059	17,58	9,49	8,09	0,37
2060	16,89	9,12	7,77	0,36
2061	16,23	8,76	7,46	0,34
2062	15,59	8,42	7,17	0,33
2063	14,98	8,09	6,89	0,32
2064	14,39	7,77	6,62	0,30
2065	13,83	7,47	6,36	0,29
2066	13,28	7,17	6,11	0,28
2067	12,76	6,89	5,87	0,27
2068	12,26	6,62	5,64	0,26
2069	11,78	6,36	5,42	0,25
2070	11,32	6,11	5,21	0,24
2071	10,88	5,87	5,00	0,23
2072	10,45	5,64	4,81	0,22
2073	10,04	5,42	4,62	0,21
2074	9,65	5,21	4,44	0,20
2075	9,27	5,01	4,26	0,20
2076	8,91	4,81	4,10	0,19
2077	8,56	4,62	3,94	0,18
2078	8,22	4,44	3,78	0,17
2079	7,90	4,26	3,63	0,17
2080	7,59	4,10	3,49	0,16
2081	7,29	3,94	3,35	0,15

Continuación Anexo 6.

Año	Biogás · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Metano · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Dióxido de carbono · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	NMOCs · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$
2082	7,01	3,78	3,22	0,15
2083	6,73	3,63	3,10	0,14
2084	6,47	3,49	2,97	0,14
2085	6,21	3,35	2,86	0,13
2086	5,97	3,22	2,75	0,13
2087	5,74	3,10	2,64	0,12
2088	5,51	2,98	2,53	0,12
2089	5,29	2,86	2,44	0,11
2090	5,09	2,75	2,34	0,11
2091	4,89	2,64	2,25	0,10
2092	4,70	2,54	2,16	0,10
2093	4,51	2,44	2,08	0,10
2094	4,33	2,34	1,99	0,09
2095	4,16	2,25	1,92	0,09
2096	4,00	2,16	1,84	0,08
2097	3,84	2,08	1,77	0,08
2098	3,69	1,99	1,70	0,08
2099	3,55	1,92	1,63	0,08
2100	3,41	1,84	1,57	0,07

Anexo 7. Especies generadas a partir de los RSU del relleno sanitario La Glorita, resultados completos del modelo *GasSIM*.

Año	Biogás · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Metano · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Dióxido de carbono · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	NMOCs · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$
1997	0,00	0,00	0,00	0,00
1998	4,51	3,83	1,74	0,01
1999	7,31	5,77	2,99	0,02
2000	9,48	6,71	4,15	0,03
2001	10,10	7,61	4,26	0,03
2002	11,38	8,06	4,99	0,03
2003	13,20	8,13	6,23	0,04
2004	13,59	8,42	6,39	0,04
2005	14,35	8,67	6,83	0,04
2006	15,92	8,37	8,03	0,04
2007	17,47	8,19	9,18	0,04
2008	18,39	8,16	9,84	0,04
2009	18,54	8,59	9,78	0,05
2010	22,33	10,13	11,86	0,05
2011	24,26	11,27	12,79	0,06
2012	25,76	11,75	13,66	0,06
2013	27,03	12,23	14,37	0,07
2014	28,44	13,11	15,03	0,07
2015	30,17	13,57	16,07	0,07
2016	31,17	13,99	16,61	0,07
2017	31,38	14,38	16,61	0,07
2018	32,58	14,72	17,32	0,07
2019	34,03	15,25	18,14	0,08
2020	35,28	15,99	18,75	0,08
2021	35,67	16,29	18,91	0,08
2022	37,95	16,89	20,28	0,08
2023	39,04	17,94	20,66	0,09
2024	40,22	18,24	21,37	0,09
2025	41,40	18,83	21,97	0,09

Anexo 7. Especies generadas a partir de los RSU del relleno sanitario La Glorita modelo GasSIM.-
continuación.

Año	Biogás · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Metano · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Dióxido de carbono · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	NMOCs · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$
2026	43,43	19,28	23,23	0,10
2027	44,53	19,88	23,77	0,10
2028	46,73	19,88	25,30	0,11
2029	49,24	20,18	26,94	0,11
2029	49,24	20,18	26,94	0,11
2030	50,49	20,78	27,60	0,11
2031	51,67	20,48	28,53	0,12
2032	53,55	20,63	29,78	0,12
2033	56,21	21,82	31,21	0,12
2034	57,70	21,97	32,19	0,12
2035	43,04	15,84	24,21	0,08
2036	32,14	12,71	17,76	0,05
2037	25,34	9,90	14,05	0,04
2038	21,23	8,49	11,70	0,04
2039	17,73	7,19	9,73	0,03
2040	15,17	6,20	8,31	0,03
2041	13,70	5,65	7,49	0,02
2042	12,10	4,83	6,67	0,02
2043	11,12	4,45	6,12	0,02
2044	9,88	3,93	5,45	0,02
2045	8,88	3,50	4,91	0,01
2046	8,01	3,26	4,39	0,01
2047	7,32	2,97	4,02	0,01
2048	6,52	2,72	3,55	0,01
2049	6,04	2,47	3,31	0,01
2050	5,41	2,21	2,96	0,01
2051	5,02	2,05	2,75	0,01
2052	4,50	1,85	2,46	0,01

Anexo 7. Especies generadas a partir de los RSU del relleno sanitario La Glorita, modelo GasSIM.-
continuación.

Año	Biogás · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Metano · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Dióxido de carbono · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	NMOCs · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$
2053	4,05	1,60	2,24	0,01
2054	3,64	1,49	1,99	0,01
2055	3,32	1,36	1,81	0,00
2056	3,06	1,23	1,68	0,00
2057	2,78	1,13	1,52	0,00
2058	2,53	1,03	1,13	0,00
2059	2,31	0,97	1,25	0,00
2060	2,13	0,86	1,17	0,00
2061	1,89	0,75	1,04	0,00
2062	1,72	0,70	0,95	0,00
2063	1,59	0,62	0,88	0,00
2064	1,44	0,60	0,78	0,00
2065	1,32	0,53	0,73	0,00
2066	1,19	0,48	0,65	0,00
2067	1,09	0,45	0,60	0,00
2068	1,01	0,41	0,55	0,00
2069	0,91	0,37	0,50	0,00
2070	0,84	0,34	0,46	0,00
2071	0,76	0,31	0,42	0,00
2072	0,70	0,28	0,38	0,00
2073	0,64	0,26	0,35	0,00
2074	0,59	0,24	0,32	0,00
2075	0,55	0,23	0,30	0,00
2076	0,50	0,22	0,27	0,00
2077	0,45	0,19	0,24	0,00
2078	0,41	0,16	0,23	0,00
2079	0,38	0,15	0,21	0,00
2080	0,35	0,14	0,19	0,00
2081	0,32	0,13	0,17	0,00

Anexo 7. Especies generadas a partir de los RSU del relleno sanitario La Glorita modelo *GasSIM*.
-continuación.

Año	Biogás · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Metano · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Dióxido de carbono · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	NMOCs · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$
2082	0,29	0,12	0,16	0,00
2083	0,27	0,11	0,15	0,00
2084	0,25	0,10	0,13	0,00
2085	0,21	0,09	0,12	0,00
2086	0,19	0,08	0,11	0,00
2087	0,18	0,08	0,10	0,00
2088	0,18	0,07	0,10	0,00
2089	0,16	0,07	0,09	0,00
2090	0,15	0,06	0,08	0,00
2091	0,14	0,06	0,07	0,00
2092	0,13	0,05	0,07	0,00
2093	0,11	0,05	0,06	0,00
2094	0,11	0,04	0,06	0,00
2095	0,10	0,04	0,05	0,00
2096	0,09	0,04	0,05	0,00
2097	0,08	0,03	0,05	0,00
2098	0,08	0,03	0,04	0,00
2099	0,07	0,03	0,04	0,00
2100	0,06	0,03	0,04	0,00

Anexo 8. Especies generadas a partir de los RSU del relleno sanitario La Glorita, resultados generales del modelo colombiano de biogás.

Año	Biogás · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Metano · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Dióxido de carbono · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	NMOCs · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$
1997	0,00	0,00	0,00	0,00
1998	4,51	3,83	1,74	0,01
1999	7,31	5,77	2,99	0,02
2000	9,48	6,71	4,15	0,03
2001	10,10	7,61	4,26	0,03
2002	11,38	8,06	4,99	0,03
2003	13,20	8,13	6,23	0,04
2004	13,59	8,42	6,39	0,04
2005	14,35	8,67	6,83	0,04
2006	14,88	8,03	6,70	0,15
2007	15,60	8,42	7,02	0,16
2008	16,28	8,79	7,33	0,16
2009	16,94	9,15	7,62	0,17
2010	19,25	10,40	8,66	0,19
2011	21,12	11,40	9,50	0,21
2012	22,68	12,25	10,21	0,23
2013	24,03	12,98	10,81	0,24
2014	25,24	13,63	11,36	0,25
2015	26,35	14,23	11,86	0,26
2016	27,45	14,82	12,35	0,27
2017	28,42	15,35	12,79	0,28
2018	29,36	15,86	13,21	0,29
2019	30,36	16,39	13,66	0,30
2020	31,39	16,95	14,13	0,31
2021	32,46	17,53	14,61	0,32
2022	33,56	18,12	15,10	0,34
2023	34,69	18,73	15,61	0,35
2024	35,85	19,36	16,13	0,36

Continuación Anexo 8.

Año	Biogás · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Metano · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Dióxido de carbono · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	NMOCs · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$
2025	37,03	20,00	16,67	0,37
2026	38,25	20,66	17,21	0,38
2027	39,50	21,33	17,78	0,40
2028	40,78	22,02	18,35	0,41
2029	42,09	22,73	18,94	0,42
2030	43,44	23,46	19,55	0,43
2031	44,82	24,20	20,17	0,45
2032	46,25	24,97	20,81	0,46
2033	437,7	25,76	21,46	0,48
2034	49,19	26,56	22,14	0,49
2035	38,46	20,77	17,31	0,38
2036	30,81	16,64	13,87	0,31
2037	25,28	13,65	11,38	0,25
2038	21,21	11,45	9,54	0,21
2039	18,14	9,80	8,16	0,18
2040	15,79	8,53	7,11	0,16
2041	13,94	7,53	6,27	0,14
2042	12,45	6,72	5,60	0,12
2043	11,23	6,06	5,05	0,11
2044	10,20	5,51	4,59	0,10
2045	9,32	5,03	4,20	0,09
2046	8,56	4,62	3,85	0,09
2047	7,89	4,26	3,55	0,08
2048	7,30	3,94	3,28	0,07
2049	6,76	3,65	3,04	0,07
2050	6,28	3,39	2,83	0,06
2051	5,84	3,15	2,63	0,06
2052	5,44	2,94	2,45	0,05
2053	5,08	2,74	2,28	0,05
2054	4,74	2,56	2,13	0,05

Continuación Anexo 8.

Año	Biogás · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Metano · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Dióxido de carbono · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	NMOCs · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$
2055	4,43	2,39	1,99	0,04
2056	4,14	2,24	1,86	0,04
2057	3,87	2,09	1,74	0,04
2058	3,63	1,96	1,63	0,04
2059	3,40	1,84	1,53	0,03
2060	3,19	1,72	1,43	0,03
2061	2,99	1,61	1,35	0,03
2062	2,81	1,52	1,26	0,03
2064	2,48	1,34	1,11	0,02
2065	2,33	1,26	1,05	0,02
2066	2,19	1,18	0,98	0,02
2067	2,06	1,11	0,93	0,02
2068	1,94	1,05	0,87	0,02
2069	1,82	0,98	0,82	0,02
2070	1,72	0,93	0,77	0,02
2071	1,62	0,87	0,73	0,02
2072	1,52	0,82	0,69	0,02
2073	1,44	0,78	0,65	0,01
2074	1,35	0,73	0,61	0,01
2075	1,28	0,69	0,57	0,01
2076	1,21	0,65	0,54	0,01
2077	1,14	0,61	0,51	0,01
2078	1,06	0,57	0,48	0,01
2079	1,00	0,54	0,45	0,01
2080	0,95	0,51	0,43	0,01
2081	0,89	0,48	0,40	0,01
2082	0,85	0,46	0,38	0,01
2083	0,80	0,43	0,36	0,01
2084	0,76	0,41	0,34	0,01
2085	0,72	0,39	0,32	0,01
2086	0,68	0,37	0,31	0,01
2087	0,64	0,35	0,29	0,01
2088	0,61	0,33	0,27	0,01
2089	0,58	0,31	0,26	0,01
2090	0,55	0,30	0,25	0,01

Continuación Anexo 8.

Año	Biogás · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Metano · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	Dióxido de carbono · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$	NMOCs · 10 ⁶ $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right]$
2091	0,52	0,28	0,23	0,01
2092	0,49	0,27	0,22	0,00
2093	0,47	0,25	0,21	0,00
2094	0,44	0,24	0,20	0,00
2095	0,42	0,23	0,19	0,00
2096	0,40	0,22	0,18	0,00
2097	0,38	0,20	0,17	0,00
2098	0,36	0,19	0,16	0,00
2099	0,33	0,18	0,15	0,00
2100	0,31	0,17	0,14	0,00

Anexo 9. Potencia eléctrica generada a partir del biogás captado del relleno sanitario La Glorita.

Año	Metano captado $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right] \cdot 10^6$	Potencia eléctrica según (Ec. 55) $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]$	Potencia eléctrica según (Ec. 56) $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]$	Potencia eléctrica según modelo colombiano $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]$
1997	0,00	0	4806	0
1998	2,35	4202	8226	4625
1999	4,02	7191	10968	8062
2000	5,37	9588	12663	10685
2001	6,20	11069	14542	12751
2002	7,12	12712	16585	14431
2003	8,11	14498	17791	15844
2004	8,70	15552	19133	17068
2005	9,36	16726	20855	18161
2006	10,20	18231	22536	19158
2007	11,03	19700	23862	20088
2008	11,68	20860	24763	20968
2009	12,12	21647	28696	21813
2010	14,04	25085	31413	24790
2011	15,37	27460	33740	27193
2012	16,51	29494	35826	29203
2013	17,53	31318	37901	30944
2014	18,54	33132	40090	32498
2015	19,62	35046	41890	33923
2016	20,50	36619	43198	35341
2017	21,14	37762	43198	36593
2018	22,02	39347	45010	37810
2019	22,99	41076	46988	39089
2020	23,92	42740	48891	40420
2021	24,65	44032	50370	41795
2022	25,86	46211	52862	43211
2023	26,79	47872	54763	44665
2024	27,76	49594	56732	46156
2025	28,73	51339	58728	47686
2026	29,95	53504	61206	49254
2027	30,93	55265	63219	50861
2028	32,21	57555	65839	52509

Continuación Anexo 9

Año	Metano captado $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right] \cdot 10^6$	Potencia eléctrica según (Ec. 55) $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]$	Potencia eléctrica según (Ec. 56) $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]$	Potencia eléctrica según modelo colombiano $\left[\frac{\text{MWh}}{\text{año}} \right]$
2029	33,59	60018	68656	54199
2030	34,67	61935	70849	55933
2031	35,74	63846	73036	57713
2032	37,00	66114	75630	59540
2033	38,49	68775	78674	61415
2034	39,70	70931	81140	63342